



**Tielaitos**

## **Moreenin jalostaminen**

**Tielaitoksen  
selvityksiä**

**77/1993**

**Oulu 1993**

**Geokeskus**  
Oulun kehitysyksikkö

Tielaitoksen selvityksiä  
77/1993

## **Moreenin jalostaminen**

**Tielaitos**  
Geokeskus, Oulun kehitysyksikkö

Helsinki 1993



ISSN 0788-3722  
ISBN 951-47-8136-8  
TIEL 3200201  
Painatuskeskus Oy  
Helsinki 1993

Julkaisun kustannus ja myynti:  
Tielaitos, hallinnon palvelukeskus,  
painotuotepalvelut  
Telefax (90) 1487 2652

**Tielaitos**

Opastinsilta 12 A  
PL 33  
00521 HELSINKI  
Puh. vaihde (90) 148 721

Geokeskus  
Oulun kehitysyksikkö  
Kansankatu 47  
PL 261  
90101 OULU  
Puh. (981) 310 9383

## TIIVISTELMÄ

Moreenien maanrakennustekniset ominaisuudet, kuten käsiteltävyys ja kantavuus, riippuvat oleellisesti hienoainespitoisuudesta. Hienoainespitoisuus vaikuttaa ratkaisevasti myös moreenin routimisherkkyyteen.

Tienrakennusta silmälläpitäen moreenin ominaisuuksia voidaan selvästi parantaa vähentämällä hienoainespitoisuutta mekaanisesti tai kemiallisesti (stabilointi). Hienoainespitoisuutta vähentämällä voidaan routivasta moreenista tehdä routimatonta ja samalla lisätä moreenin kantavuutta sekä sen pysyvyyttä myös märkänä.

Mekaanisessa jalostuksessa pyritään saamaan moreenille haluttu raekokojakauma. Mekaanisissa menetelmissä raekokojakaumaan ja hienoaineksen prosentuaaliseen määrään voidaan vaikuttaa murskauksella, erottelulla ja sekoituksella. Moreenin jalostuksessa erottelu voidaan toteuttaa välppäyksellä, seulonnalla tai pesulla. Usein eri erotusmenetelmiä yhdistetään toisiinsa. Sekoituksen lähtökohtana on, että sekoituksessa saatavan materiaalin ominaisuudet ovat paremmat kuin kummankaan lähtömateriaalin. Yleensä kahden ainesosan sekoittaminen on riittävä.

Stabiloinnilla saadaan aikaan maa-aineksen karkeutumista ja rakeiden osittaista kiinnittymistä. Stabiloinnin avulla maa-aineksen kantavuus paranee ja routivuus vähenee. Stabilointiaineina voidaan käyttää sementtiä, bitumia ja kalkkia. Sementtiä ja bitumia käytetään karkeahkon, jonkin verran hienoainesta sisältävän maa-aineksen stabilointiin. Kalkkistabilointi soveltuu taas parhaiten hienon, silttisen maa-aineksen stabilointiin.

Pienillä sideainepitoisuuksilla (1 - 3 %) voidaan parantaa moreenin stabiiliisuutta ja pienentää routivuutta. Haluttaessa lisätä kantavuutta tulee käyttää suurempia sideainepitoisuuksia kuin edellä. Käytännössä lujittamiseen tarvittava sideainemäärä vaihtelee sementtistabiloinnissa 4 - 7 %, kalkkistabiloinnissa 4 - 12 % ja bitumistabiloinnissa 3 - 5 %.

Stabiloinnin avulla saatua materiaalia voidaan käyttää kaikissa tien rakennekerroksissa paitsi ei pysyvänä kulutuskerroksena. Käyttö riippuu siitä, mihin stabiloinnilla pyritään.

Sementti- ja bitumistabiloidut moreenit soveltuvat hyvin jakavaksi ja kantavaksi kerrokseksi. Kalkkistabiloidut moreenit taas soveltuvat jakavaksi tai kantavaksi kerrokseksi vähäliikenteisillä teillä. Alusrakenteeksi kalkkistabiloitu kerros soveltuu hyvin myös korkealuokkaisilla teillä.

## ALKUSANAT

Tässä kirjallisuuteen pohjautuvassa selvityksessä käsitellään Suomessa yleisimmin esiintyvän luonnonmateriaalin, moreenin jalostusmahdollisuuksia ja -tapoja. Moreenin esiintymistä ja sen käyttöä tienpidossa on käsitelty julkaisussa "Moreeni ja sen käyttö" (tielaitoksen selvityksiä 20/1993).

Selvityksessä käsitellään julkaisujen ja eri raporttien perusteella moreenien mekaanisia ja kemiallisia jalostustapoja. Mahdollisia jalostustapoja on runsaasti, mutta käytännön kokeilut ovat rajoittuneet lähinnä moreenin murskaukseen ja sementillä käsittelyyn (stabilointiin). Tulevaisuudessa tullaan käyttämään pääasiassa eri jalostustapojen yhdistelmiä.

Tämä raportti perustuu insinööritoimisto PSV Oy:n tielaitoksen Oulun kehitysyksikölle tekemään kirjallisuustutkimukseen. Insinööritoimisto PSV Oy:stä projektissa työskentelivät TkT Esko Ehrola, DI Pekka Koskela ja FM Pentti Viitanen. Oulun kehitysyksiköstä työtä valvoi DI Seppo Salmenkaita. Tämän raportin on alkuperäisaineiston pohjalta laatinut Seppo Salmenkaita. Raportissa esiintyvät kannanotot ja mielipiteet ovat raportin laatijan, eivätkä ne välttämättä edusta tielaitoksen virallista kantaa.

Oulussa joulukuussa 1993

Geokeskus  
Oulun kehitysyksikkö

---

 SISÄLTÖ
 

---

1	JOHDANTO	9
1.1	Yleistä	9
1.2	Jalostuksen tarve, tavoitteet ja menetelmät	9
2	MEKAANINEN JALOSTUS	10
2.1	Murskaus	10
2.1.1	Yleistä	10
2.1.2	Murskauskaitokset ja varastointi	11
2.1.3	Murskauksen vaikutus moreenin raejakaumaan	17
2.2	Erottelu	18
2.2.1	Yleistä	18
2.2.2	Välppäys	18
2.2.3	Seulonta	18
2.2.4	Pesu	23
2.2.5	Erottelyn vaikutus moreenin raekokojakaumaan	27
2.3	Sekoitus	28
2.4	Yhteenvedo moreenin mekaanisesta jalostuksesta	29
2.4.1	Murskaus	30
2.4.2	Erottelu	31
2.4.3	Sekoitus	32
3	STABILOINTI	34
3.1	Yleistä	34
3.2	Sementtistabilointi	36
3.2.1	Sementtistabiloinnin perusteet	36
3.2.2	Stabiloinnin suunnittelu ja kerrospaksuuden mitoitus	46
3.2.3	Stabilointityön toteutus	57
3.2.4	Stabilointityön valvonta	70
3.3	Kalkkistabilointi	74
3.3.1	Perusteet	74
3.3.2	Stabiloinnin suunnittelu ja kerrospaksuuden mitoitus	77
3.3.3	Stabilointityön toteutus	79
3.3.4	Valvonta	80
3.4	Bitumistabilointi	82
3.4.1	Bitumistabiloinnin perusteet	82
3.4.2	Bitumistabiloinnin suunnittelu ja kerrospaksuuden mitoitus	86
3.4.3	Bitumistabilointityön toteutus	92
3.4.4	Valvonta	98
3.5	Masuunihiekka stabiloinnissa	99
3.6	Stabilointi aineyhdistelmillä	100
4	JOHTOPÄÄTÖKSET	102
5	KIRJALLISUUSLUETTELO	104



# 1 JOHDANTO

## 1.1 Yleistä

Tienpidossa varteenotettavaksi vaihtoehdoksi materiaalin hankinnassa on tullut rakennuspaikalta tai sen välittömästä läheisyydestä saatavien materiaalien käyttö. Tämä johtuu perinteisten tienpitomateriaalien vähenemisestä ja kuljetusmatkojen pitenemisestä. Suomen maaperästä yli puolet on moreenia, jolloin puhuttaessa rakennuspaikalta saatavan materiaalin käytöstä, tulee useissa tapauksissa kyseeseen moreenin käyttö tienrakennusmateriaalina.

Vaativiin rakenteisiin, esim. tien päällysrakenteeseen, eivät moreenit useinkaan sovellu sellaisenaan, vaan niiden maanrakennusmekaanisia ominaisuuksia tulee parantaa. Parantamismenetelminä tulevat kysymykseen erilaiset jalostusprosessit. Käsilläolevassa kirjallisuustutkimuksessa tarkastellaan moreenin mekaanisten ja kemiallisten jalostusmenetelmien prosesseja sekä käyttömahdollisuuksia.

Eri raporttina julkaistussa kirjallisuusselvityksessä käsitellään moreenien käyttömahdollisuuksia ja -kohteita tierakenteissa. Siinä kartoitetaan aluksi tienpitoon käyttökelpoisen moreenin esiintymistä Suomessa. Tämän jälkeen selvitetään moreenin maanrakennusteknisiä ominaisuuksia, jotka vaikuttavat moreenimateriaalin käyttöön tienpitomateriaalina. Näiden perusteiden ja nykyisen käytännön pohjalta tarkastellaan seuraavaksi luonnonmoreenin käyttömahdollisuuksia tienpitomateriaalina.

## 1.2 Jalostuksen tarve, tavoitteet ja menetelmät

Moreenin käytön ongelmana on moreenin routivuus ja heikko kantavuus märkänä. Sekä routivuus että kantavuus riippuvat oleellisesti moreenin hienoainespitoisuudesta. Mitä suurempi hienoainespitoisuus on, sitä heikommin moreeni yleensä soveltuu tienrakennukseen.

Tienrakennusta silmälläpitäen moreenin ominaisuuksia voidaan selvästi parantaa vähentämällä hienoainespitoisuutta mekaanisesti tai kemiallisesti (stabilointi). Hienoainespitoisuutta vähentämällä voidaan routivasta moreenista tehdä routimatonta ja samalla lisätä moreenin kantavuutta sekä sen pysyvyyttä myös märkänä.

Mekaanisessa jalostuksessa pyritään saamaan moreenille haluttu raekokojakauma. Mekaanisissa menetelmissä raejakaumaan ja hieno-aineksen prosentuaaliseen määrään voidaan vaikuttaa murskauksella, erottelulla ja sekoituksella. Tärkeimpiä erottelutekniikoita ovat välppäys, seulonta ja pesu. Usein eri erotusmenetelmiä yhdistetään toisiinsa.

Stabiloinnilla saadaan aikaan maa-aineksen karkeutumista ja rakeiden osittaista kiinnittymistä. Stabiloinnin avulla maa-aineksen kantavuus paranee ja routivuus vähenee. Stabilointiaineina voidaan käyttää sementtiä, bitumia ja kalkkia. Sementtiä ja bitumia käytetään karkeahkon, vain jonkin verran hienoainesta sisältävän maa-aineksen stabilointiin. Kalkkistabilointi soveltuu taas parhaiten hienon, silttisen maa-aineksen stabilointiin.

## 2 MEKAANINEN JALOSTUS

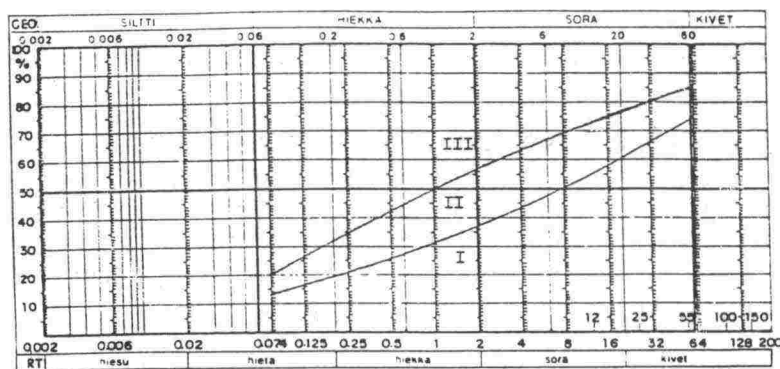
### 2.1 Murskaus

#### 2.1.1 Yleistä

Moreenin murskauksella pyritään pääasiassa saamaan lähtökiviaineksen rakeisuus sellaiseksi, että se täyttää mahdollisimman hyvin moreenimurskekerrokselle tai soratien kulutuskerrokselle asetetut vaatimukset.

Arvioitaessa moreenin kelpoisuutta raaka-aineeksi murskauslaitokseen tulee se tehdä ensikädessä lähtömateriaalin ja tavoitemateriaalin sekä materiaalin ottopaikan sopivuuden perusteella.

Murskauskelpoisen moreenin tulee olla mahdollisimman kivistä. Yli 64 mm:n suuruisia kiviä ja lohkaraita tulisi olla vähintään 25 % (kuva 1). Hienoainesmäärä (raekoko alle 0,074 mm) voi vaihdella 10 - 20 %:n välillä 0 - 65 mm seulantakäyrällä. Mitä runsaskivisempää moreeni on, sitä suurempi voi myös hienoainespitoisuus olla (Niskanen 1981).



Luokka I	Murskauskelpoinen moreeni
	* kivisyys yli 25 %, hienoainesta alle 13 %
Luokka II	Määrätyin edellytyksin murskauskelpoinen moreeni
	* murskauskelpoisuus on aina todettava lisätutkimuksin
	* kivisyys yli 15 %, hienoaines alle 20 %
Luokka III	Moreeni ei ole murskauskelpoinen
	* luokkia I ja II vähäkivisemmät ja/tai hienoainespitoisemmat moreenit

Kuva 1: Moreenin käyttökelpoisuusluokkien rakeisuusohjealue (TVH 1986).

Hyödyntämiskelpoisen moreeniesiintymän tulee sijaita siten, että murskaus voidaan suorittaa mahdollisimman kuivissa olosuhteissa. Raaka-aineen kosteuspitoisuuden ylittäessä 6 % kasvaa seulojen ja siilojen tukkeutumisvaara (Niskanen 1981).

Moreeniesiintymiä on murskattu myös talvella. Pakkasen ei ole todettu huomattavasti vaikeuttavan murskaustyötä. Talvella työsaavutusta pienentävät materiaalin jäätyminen syöttösiilon seinämiin ja holvaantumises-ta ajoittain aiheutuvat häiriöt. Materiaalin tarttuminen on huomattavaa lämpötilan ollessa alle  $-10^{\circ}\text{C}$ . Taukojen ajaksi siilo ja kuljettimet on ajettava tyhjäksi jäätymisen vuoksi (Niskanen 1981).

Murskattaessa talvella materiaali ei saisi sisältää lunta. Keväällä lumen sulassa sulamisvesi aiheuttaa moreenin stabiliteetin ja käsiteltävyyden heikkenemistä. Paras murskausaika on kesä-, heinä- ja elokuussa.

Moreenin murskaus on tavanomaisesti noin 10 % kalliimpaa kuin normaali murskaus (ylitarkastaja Reijo Orama/TIEL/Gk). Ruotsalaiset ovat omis-sa kokeiluissaan todenneet, että moreenin murskaus on ollut taloudellises-ti kannattavaa, kun kuljetusmatkaero sora- tai kalliomurskeeseen nähden on ollut  $\geq 5$  km. Parhaassa moreenipaikassa riitti 1 km:n kuljetusmatkaero tuottamaan moreenin murskauksen edullisemmaksi kuin soran murska-uksen (Vägverket 1987, Vägverket 1990).

### 2.1.2 Murskauslaitokset ja varastointi

Murskauslaitokset voidaan ryhmitellä siirtotavan, syötettävän materiaalin ja murskausvaiheiden määrän perusteella.

Siirtotavan perusteella murskauslaitokset ryhmitellään:

- kiinteisiin murskauslaitoksiin
- puolikiinteisiin laitoksiin
- pyörillä varustettuihin ns. mobilelaitoksiin.

Siirrettävissä ja kiinteissä laitoksissa koneet ovat samanlaiset. Laitokset poikkeavat toisistaan tukirakennelmien ja koneiden ryhmityksen perus-teella. Siirrettävien laitosten koneet ja koneyhdistelmät varustetaan kulje-tuspyörästöllä siirron helpottamiseksi. Siirrettävyydestä johtuen saattaa laitoksen hankintahinta lisääntyä jopa 40 %, toisaalta kiinteän laitoksen pystytyskustannukset voivat olla 10 - 15 % hankintahinnasta. Mobiililai-tokset ovat huolto- ja korjausmielessä vaikeampia kuin kiinteät, koska ko-neyksiköt ovat lähellä toisiaan (Rakennuskoneet 1972).

Murskausvaiheiden lukumäärän mukaan laitokset ryhmitellään yksivai-he-, kaksivaihe- ja kolmivaihelaitoksiksi jne. Murskausvaiheiden lukumää-rä on riippuvainen seuraavista tekijöistä:

- suunnitellun murskaustyön kokonaismurskaussuhteesta
- laitoksen kapasiteetista
- tuotteen laatuvaatimuksista.

Murskausvaiheiden minimimäärä määräytyy eri murskaimien murskaus-suhteen perusteella. Taulukossa 1 on eri murskaimien murskaussuhteet

koville kiville. Leukamurskainyhdistelmillä voidaan päästä kokonaismurskaussuhteeseen 25 - 36 (Rakennuskoneet 1972).

Murskauslaitoksen kapasiteettia saadaan nostetuksi käyttämällä useita murskausvaiheita ja väliseulontoja. Tuotteen laatu paranee myös usean vaiheen ansiosta. Mitä useampia murskausvaiheita on, sitä enemmän saadaan kuutiomaisia rakeita.

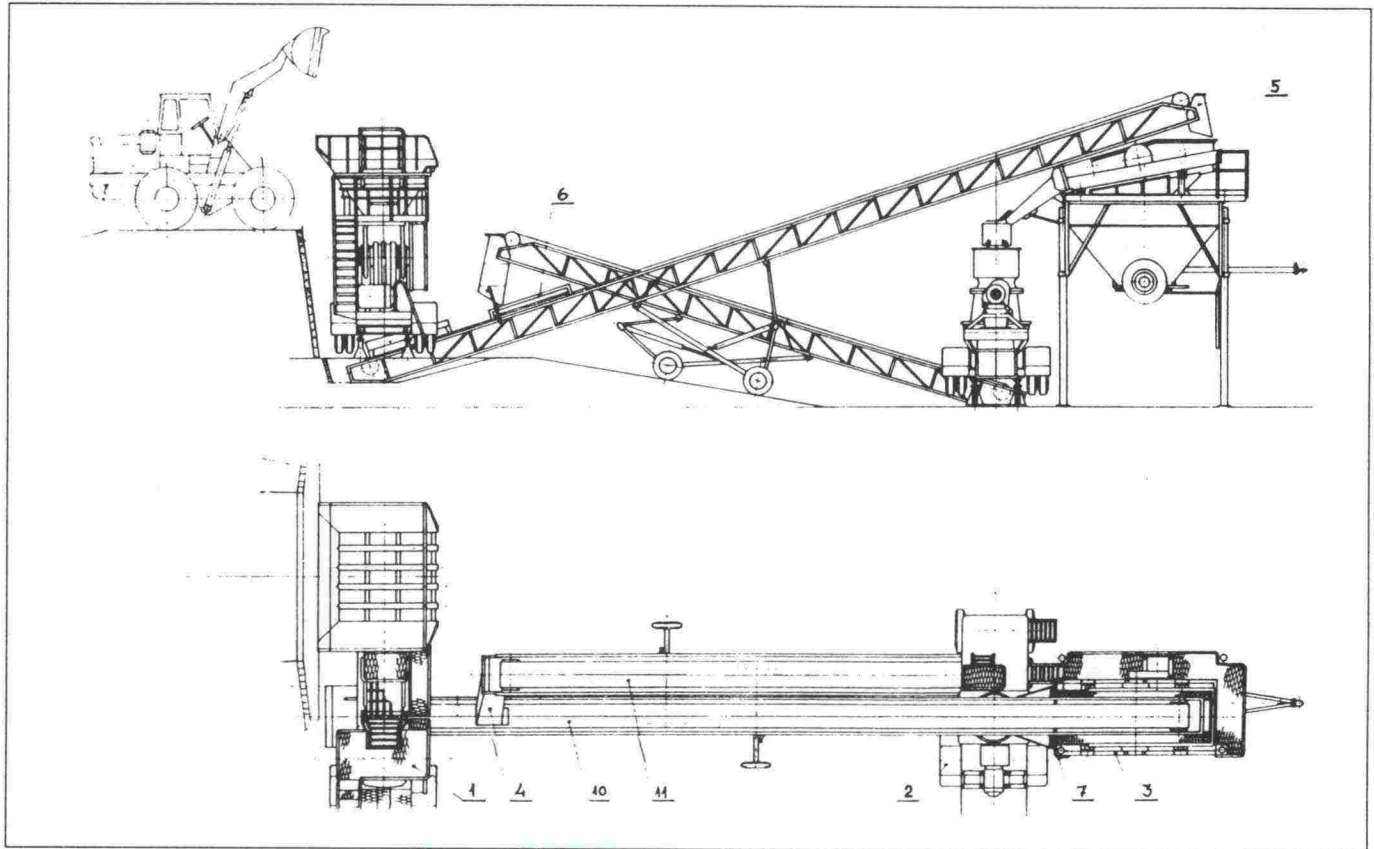
Taulukko 1: Eri murskaimien murskausmenetelmät (Rakennuskoneet 1972).

Murskain	Murskaussuhde
Leukamurskain	5 - 6
Kara- ja kartiomurskain	5 - 6
Kaksivalssimurskain	3 - 4
Iskumurskain	6 - 8
Vasaramurskain (pehmeä kivi)	10 - 20

Murskauslaitosten peruskoneita ovat murskaimet ja seulat. Näiden lisäksi tarvitaan syöttölaitteita, kuljettimia, siloja, käyttölaitteita ja apurakennelmia. Taajama-alueilla joudutaan laitoksiin sijoittamaan myös pölynpoistolaitteita.

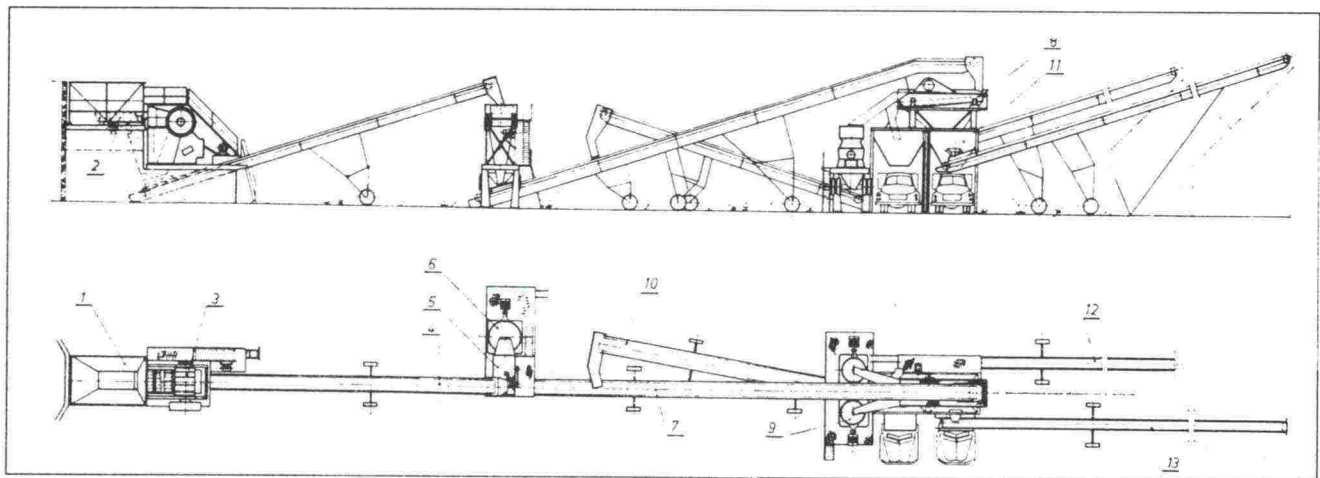
Kuvissa 2 ja 3 on kaaviokuvia murskauslaitosten kokoonpanoista. Kuvan 2 murskauslaitos on tyypillinen kaksivaiheinen murskauslaitos ns. ML6-laitos. Laitoksen menetelmäkapasiteetti vaihtelee 30 - 150 m<sup>3</sup>itd/h syötettävästä materiaalista ja halutusta tuotteesta riippuen. Suurin murskattava kivikoko on 340 mm. Etumurskaimena (1) on kiertomurskain ja jälkimurskaimena karamurskain.





Kuva 2: Kaksivaiheinen murskauslaitos.

- 1) Esimurskaamo, 2) Jälkimurskaamo, 3) Lajittamo, 4) Suuntaustyyny, 5) Purkutyyny, 6) Syöttökaukalo, 7) Kuljettimen kannatin, 8) Keskus- ja valvontavaunu, 9) Aggregaattivaunu, 10 ja 11) Kuljettimia (Rakennuskoneet 1972).



Kuva 3: Kolmivaiheinen murskauslaitos.

- 1) Suppilo, 2) Vaakatasosyötin, 3) Kiertomurskain, 4) Kuljetin, 5) Vaakatasosyötin, 6) Karamurskain, 7) Kuljetin, 8) Vaakatasosyötin, 9) Karamurskain, 10) Kuljetin, 11) Siilo, 12 ja 13) Kuljettimia (Rakennuskoneet 1972).

Kuvassa 3 on 3-vaiheinen murskauslaitos. Sillä voidaan valmistaa 6 eri lajikeä yhtäaikaan. Suurin murskattava kivi on 900 mm. Laitoksessa on esimurskaimen jälkeen sijoitettu välivarasto, jonka avulla saadaan esimurskaimen epätasaisesta syötöstä huolimatta välimurskaimelle tasainen kuormitus. Seuloina laitoksessa on käytetty vaakatasosyöttimiä.

Yleensä moreenin murskaus vaatii järeän kaluston. Tämä johtuu siitä, että parhaimmat moreenialueet ovat suurikivisiä ja lohkaraisia, joissa pienikiteiset murskaajat eivät ole käyttökelpoisia.

Kaksivaiheisessa murskauksessa yhdistelmä leukamurskain + kartio on todettu hyväksi (Heikkilä 1986).

Moreeneja voidaan murskata seuraavanlaisilla laitteilla:

- tavalliset, pienet murskaamot ( $\leq$  ML 100)  
esim. Lokomo C80 + G1810
- tavalliset, isot murskaamot ( $>$  ML 100),  
esim. Lokomo C125 + G3210
- liikkuva murskaamo,  
esim. Lokomo C83 + Symons 3'STD x HD.

Hyvissä olosuhteissa moreenin murskaus onnistuu kaikenlaisilla murskaamoilla. Hienoainespitoinen ja kostea moreeni tuottaa vaikeuksia kaikille murskaamotyypeille. Maa-ainessyötteellä ja olosuhteilla on suurempi merkitys kuin murskauskalustolla työn suorituksen kannalta. Suurien murskaamojen etuja ovat mahdollisuus murskata isoja kiviä ja lohkaraita sekä suurempi kapasiteetti. Isojen murskaamojen haittapuoleina on heikko liikuteltavuus. Pienempiä murskaamoja on taas helpompi siirtää, mutta niiden murskausteho ei ole niin hyvä kuin suurilla murskaamoilla. Merkittävimpiä kaluston valintaan vaikuttavia tekijöitä ovat (Heikkilä 1986):

- moreeninottopaikan sijainti ja koko  
(murskaamon siirtotarve)
- moreenin laatu  
(kivisyys ja hienoainespitoisuus, ts. raekoko)
- tuotteelle asetettavat laatuvaatimukset
- haluttu murskausteho.

Kainuusta saatujen murskauskokemusten perusteella on ehdotettu, että kiinteällä murskauslaitoksella esiintymän koon tulisi olla vähintään 10000 - 15000 m<sup>3</sup>. Ainespaikan rintausten sopiva korkeus on 3 - 6 m (Niskanen 1981).

Moreeninottopaikan koko ja sijainti vaikuttavat murskaamon siirtotarpeeseen ja siirtoväliin. Suurilla esiintymillä kannattaa käyttää isoja murskaamoja, koska niiden kapasiteetti ja teho on parhain. Esiintymän ollessa pieni, joudutaan murskaamoja usein siirtämään, jolloin tulee kannattavammaksi käyttää pienempien siirtokustannusten vuoksi pientä murskaamoja kuin suurta murskaamoja. Jos murskaamoja joudutaan siirtämään hyvin usein, on edullisinta käyttää liikuvaa murskainta. Esiintymän sisältäessä runsaasti isoja kiviä, voi ison murskaimen käyttö tulla edullisemmaksi myös pienemmissä esiintymissä, koska isoilla murskaimilla vältetään suurien kivien ja lohkaraiden etukäteen rikkomiselta.



Isoilla murskaamoilla saadaan yleensä tasalaatuisempaa tuotetta kuin pienillä murskaamoilla.

Käytettäessä tielinjalla liikkuvaa murskauslaitteistoa (Mertsä-murskaamo), voidaan käyttää tehokkaasti myös alle 2000 m<sup>3</sup> suuruiset moreeniesiintymät. Jos moreenia otetaan pitkin tielinjaa, suositeltava moreeninottoaikojen välinen etäisyys on 50 - 100 m. Murskattava materiaali tulisi mahdollisuuksien mukaan kaivaa tienvieruspenkoista. Jos penkkaa ei ole, ei materiaalia pitäisi ottaa välittömästi tien reunasta. Kaivinkone tai traktorikaivuri olisi sijoitettava niin, että koneen levyinen maakaistale jää murskaimen ja moreenikuoppien väliin (Pulkki & Aitolahti 1984).

Murskattaessa tielinjalla olevaa moreenia tulee varmistaa, että toiminta ei riko asiaa koskevaa menetelmäpatenttia. Patentti on kuvattu seuraavasti (Patentti- ja rekisterihallitus, patenttihakemus 772679, kuulutusjulkaisu 61226): "Menetelmä murskatun kiviainetuotteen käyttämiseksi tienrakennuksessa, erityisesti ns. metsäautoteiden rakenteeksi murskauskoneen avulla, joka sovitetaan eteneväksi tien rakennussuunnassa, ja jonka aikaansaama murske levitetään välittömästi tielle koneen perässä joko koneessa itsessään olevilla laitteilla tai toisen laitteen avulla, t u n n e t t u siitä, että murskatun tuotteen lähtöaineena käytetään tienrakennuspaikalta otettua tai kerättyä moreenimaata, jolloin siinä oleva karkeampi kiviaine murskautuu pienemmäksi samalla, kun moreenimaan hienompi aineosa toimii sitovana aineena kestävän tiepohjan aikaansaamiseksi." Edellä olevan perusteella murskaukseen käytettävä laitteisto ei kuulu patentin alaisuuteen.

Moreeninottokuopat tulisi kaivaa pitkänomaisiksi ja tien suuntaisiksi. Kaikki ylisuuret kivet olisi laskettava maahan maakaistaleen ja moreeninottokuopan väliin. Liikkuvan murskaussysteemin etuna ovat sen joustavuus ja mukautuvuus vaihteleviin olosuhteisiin. Varjopuolena on murskaustuotteen laadun vaihtelu syötettävän moreenin laadun vaihdellessa. Liikkuvan murskaimen arvioitu maksimituotos (raekoko 50 - 55 mm) on keskimäärin 55 m<sup>3</sup>/h murskattaessa sorakuopalla. Kun murskaus suoritetaan tien vierustalla, maksimituotoksen arvioidaan olevan 40 m<sup>3</sup>/h (Pulkki & Aitolahti 1984).

Jotta saavutettaisiin paras hyöty liikkuvan murskaimen käytöstä, tulisi murskeen syötön sekä ajo- ja levityskapasiteetin olla hieman suurempi kuin murskaimen murskaus- ja tuottokapasiteetti.

Käytettäessä tielinjalla tapahtuvaa murskausta, saavutetaan seuraavia etuja:

- vältetään leikkausmassojen poiskuljetukselta ja läjittämiseltä
- vältetään murskesoran hankinnoilta ja kuljetuksilta
- kun moreenia kaivetaan tien reunoilta, muodostuvat ojat samalla tien reunoille.

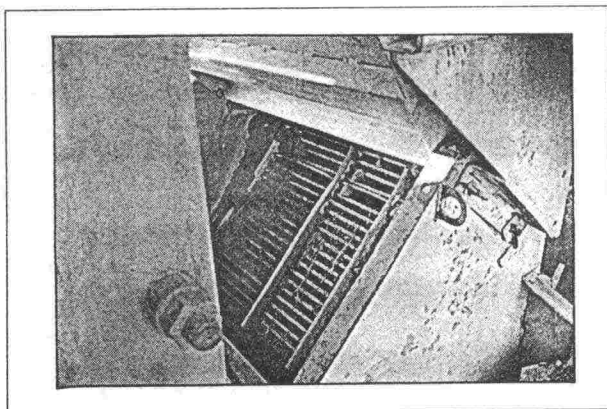
Liikkuvan murskaamon toteutuneet työsaavutukset ovat olleet 40 - 80 m<sup>3</sup>itd/h vaihdellen olosuhteiden ja tuotteen maksimiraekoon mukaan seuraavasti:

- esimurskain
  - \* tuote 0 - 100 mm 60 - 80 m<sup>3</sup>itd/h
  - \* tuote 0 - 65 mm 50 - 70 m<sup>3</sup>itd/h
- esimurskain + jälkimurskain
  - \* tuote 0 - 15 mm 40 - 60 m<sup>3</sup>itd/h
  - \* tuote 0 - 32 mm 50 - 70 m<sup>3</sup>itd/h

Murskauksen työsaavutusta voidaan lisätä seulomalla hienoaines aina 50 mm:n raekokoon asti syötteestä ennen murskausta. Tällä tavoin lisätään etumurskaajan kapasiteettia, estetään murskaimen tukkeutumista ja vähennetään murskaimen leukojen kulumista. Pitkäaukkoisen ja ohutlankaisen seulaverkon on todettu olevan hyvä. Seulapinnan tulisi olla tavanomaista suurempi. Toisaalta myös ylisuuret kivet tukkivat murskaimen kita-aukon ja aiheuttavat tehollisen murskausajan menetystä. Tämä voidaan estää asentamalla syöttökouruun viettävät teräspalkit, jotka eivät päästä ylisuuria kiviä kita-aukkoon.

Ruotsalaiset ovat saavuttaneet erittäin lupaavia tuloksia käyttämällä 45 asteen kulmassa olevaa tankoseulaa syöttimen väljän alla (kuva 4, Leveranstidningen Entreprenad, 26 oktober 1992, Nr 44, sivut 4 - 5).

Moreenin irrotukseen tulee käyttää riittävän tehokasta kaivinkonetta johon tuen moreenin suuresta kaivuvastuksesta. Kaivinkoneen tulisi olla vähintään keskiraskas tela-alustainen kone (KKH21). Murskattavan materiaalin syötön suorittava pyöräkuormaajan (KUP) kuljettaja on avainasemassa tasalaatuisen murskaustuotteen saamiseen. Kaivinkone voi myös edesauttaa tasalaatuisen murskeen saamista toimimalla esilajittelijana kasaamalla sopivasti kiviä ja hienoainesta sisältäviä kasoja sekä erottelemalla ylisuuret kivet.



Kuva 4: Ruotsalaisten käyttämä tankoseula.

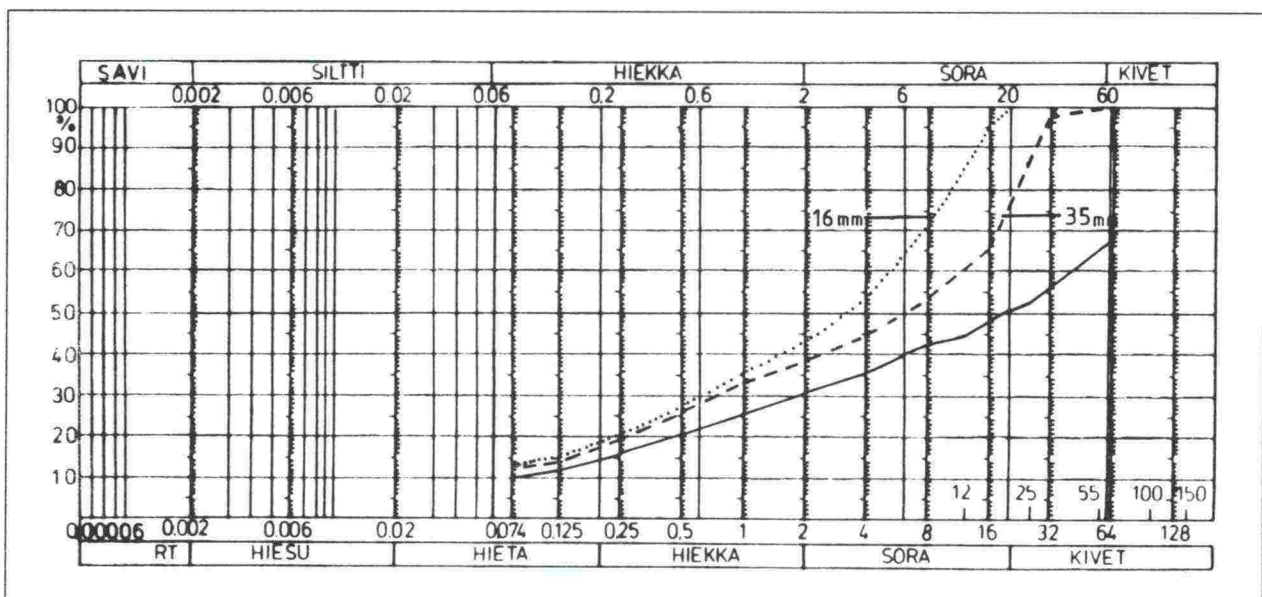


Moreenimurske varastoidaan mieluiten kasoihin tai kuljetetaan suoraan käyttökohteeseen. Jos moreeni tai murskattu moreeni joudutaan läjittämään, tulisi läjittäminen tehdä hyvin vettäjohtavien kerrosten päälle tai läjitys paikka salaojittaa, jotta moreeni pääsisi kuivumaan. Lisäksi tulisi valmiit läjät peittää sateelta, jotta lisäveden tulo estettäisiin. Jos käytettäväksi otettava moreeni on liian kostea, on läjittäminen paras keino vähentää kosteutta.

### 2.1.3 Murskauksen vaikutus moreenin raekajakaumaan

Kuvassa 5 on esitetty erään moreenin murskauksen tulos esimerkkinä murskauksen vaikutuksesta raekokojakaumaan. Lähtökiviaineksen rakeisuuskäyrä on merkitty yhtenäisellä viivalla ja saatujen 16 mm sekä 35 mm murskeiden rakeisuuskäyrät katkoviivalla. Murskeiden rakeisuuskäyriä verrattaessa lähtökiviaineksen käyrään (isoseulontakäyrä, kivet mukana) voidaan havaita, ettei murskaus lisää merkittävästi hienoaineksen määrää. Murskauksen vaikutus moreenin raekokojakaumaan painottuu selvästi sora-aineksen lisääntymiseen. Murskauksen avulla voidaan lisätä sora-aineksen määrää ilman, että hienoaineksen määrä lisääntyy merkittävästi.

Hienoaineksen määrää voidaan vähentää liittämällä murskausprosessiin seulonta ja/tai välppäys. Hienoaineksen erottaminen kannattaa tehdä ennen varsinaista murskausta. Näin voidaan lisätä murskaamon kokonaistehoa ja vähentää murskainten leukojen kulumista.



Kuva 5: Moreenin murskauskäyriä. Lähtöaineksen rakeisuuskäyrä on yhtenäisellä viivalla ja murskeiden 16 mm ja 35 mm rakeisuuskäyrät ovat katkoviivalla.

## 2.2 Erottelu

### 2.2.1 Yleistä

Erottelumenetelmät ovat mekaanisia jalostuskeinoja, joilla voidaan muuttaa moreenin raakoostumusta, etenkin hieno-ainespitoisuutta paremmin käyttökohteen materiaalivaatimuksia vastaavaksi.

Moreenin käytön suurin ongelma on sen sisältämä suuri hienoainemäärä. Karkeiden rakeiden käsittely ja jalostaminen ei ole yleensä ongelma. Tärkeimpiä erottelutekniikoita ovat välppäys, seulonta ja pesu.

### 2.2.2 Välppäys

Välppäystaso koostuu välppäyskiskoista. Välppäystason kaltevuutta ja kiskovälejä voidaan säätää syötettävän raaka-aineen ja halutun tuotteen mukaan. Eräs ongelma soravälppien käytössä on ollut kivien aiheuttama kiskovälien tukkeutuminen ja mahdollisen välppämiehen turvallisuus. Välppämiehen käytöstä on voitu luopua, kun välppä on pidetty puhtaana pyöräkuormaajalla. Kivien kiilautumista välppäyskiskojen väliin voidaan vähentää rakenteella, jossa joka toinen välppäkisko kohoaa kallistuksen yhteydessä muutaman sentin alapäästään. Välppää kallistetaan joka kolmannen tai joka kuudennen kauhallisen yhteydessä välppän puhdistamiseksi kivistä.

Välppäyksessä erottuvat ylisuuret kivet voidaan rikkoa ja/tai murskata. Välppätyille kiville voi eräissä tapauksissa olla käyttöä sellaisenaan esim. pengertäytteenä. On kuitenkin muistettava, ettei yli 600 mm kiviä voida sijoittaa tiehen 1,5 m lähemmäksi tasausviivaa.

### 2.2.3 Seulonta

Seulomalla pyritään erottamaan moreenissa oleva hienoaines pois ja saamaan raekokojakauma halutunlaiseksi. Haitallinen hienoaines on kiinnittynyt isompiin rakeisiin yleensä melko lujasti. Pelkällä seulonnalla voidaankin poistaa vain osa hienoaineksesta. Vasta pesun avulla saadaan hienoaines erotettua lähes kokonaan. Seulonta voi olla kuiva- tai märkäseulonta. Murskausprosessiin liitettynä voidaan seulonta tehdä ennen tai jälkeen murskauksen. Suositeltavaa olisi tehdä seulonta ennen murskausta, jolloin murskauskapasiteetti kasvaa ja murskaimen leukojen kuluminen vähenee.

Kuivaseulonnassa luonnonkostean kiviaineksen erotusrajana pidetään 8 mm raekokoa (Heikkilä 1986). Materiaalin vesipitoisuuden ylärajana pidetään 6 %, jonka jälkeen seulat alkavat tukkeutua (Niskanen 1981).

Märkäseulonnassa seulalla liikkuvaan kiviainekseen suihkutetaan vettä. Lisävesi löyhentää rakeiden välisiä sidoksia, jolloin seulonta onnistuu aina 1 - 2 mm asti (Heikkilä 1986). Märkäseulonnassa seulapinnan yläpuolelle sijoitetaan vesiputkisto, josta vesi ruiskutetaan leveänä suihkuna seulottavan kiviaineksen päälle. Vettä tarvitaan 1 - 2 m<sup>3</sup> seulottavaa murskekuutiota kohti. Tarpeen vaatiessa voidaan märkäseulonnan yhteydessä jakaa

koko kiviaines eri lajitteisiin. Jos halutaan vain erottaa hienoaineksia, tehdään ensin kuivaseulonta, jonka jälkeen suoritetaan pesu vain hienoainekselle. Koska hienoaineksen erottaminen moreenista voi olla hankalaa, on syytä kokeilla erikoisseulojen käyttöä. Tässä esityksessä ei kuitenkaan puututa eri erikoisseulojen käyttökelpoisuuteen moreenin jalostamisessa johtuen käytännön tiedon puuttumisesta.

Käytettävissä olevia tavallisia seuloja ovat:

- vapaavärähtelyseulat
- vaakatasoseulat
- epäkeskoseulat
- resonanssiseulat
- sähkömagneettiset täryseulat.

Moreenin seulonnessa vaakatasoseulat eivät ole kovin hyviä, koska kuorimat seulalla kasvavat suuriksi aiheuttaen laakerivikoja. Tästä syystä seuloja on kallistettava melkoisesti (noin 45°).

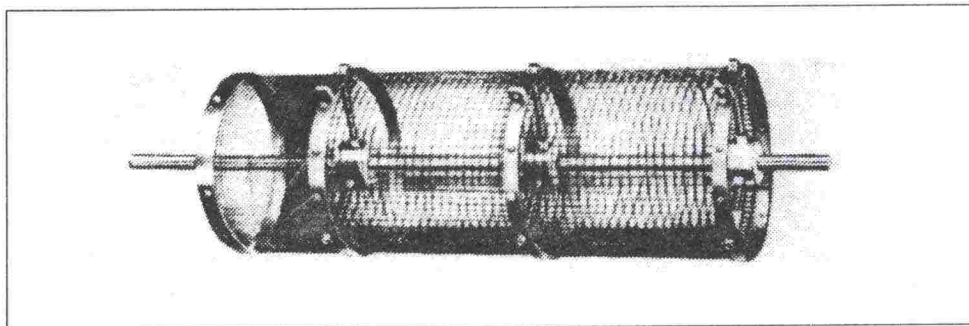
Seulontatehokkuutta voidaan parantaa tärytyksellä ja kuivattamalla hienoainesta. Moreeneja seulottaessa joudutaan yleensä aina käyttämään tärytystä. Kuivaus voidaan tehdä esim. kuivausrummussa tai lämmittämällä seulapintoja. Seulontatehoa voidaan parantaa myös seulaverkon muodon ja materiaalivalinnan avulla. Pitkääaukkoinen ja ohutlankainen seulaverkko on todettu hyväksi. Polyesterilankojen ja kumilankojen seulontateho ja kestävyys on todettu olevan parempi kuin teräslangan. Kiilan muotoiseksi tehty polyuretaaniverkko on kestänyt viisi kertaa kauemmin kuin teräsverkko.

Käytettävissä olevia erikoisseuloja ovat (Heikkilä 1986):

- rumpuseula
- hyrräseula
- Mogensen-luokitin
- kaariseula
- Hukki-seula
- pyöröseula.

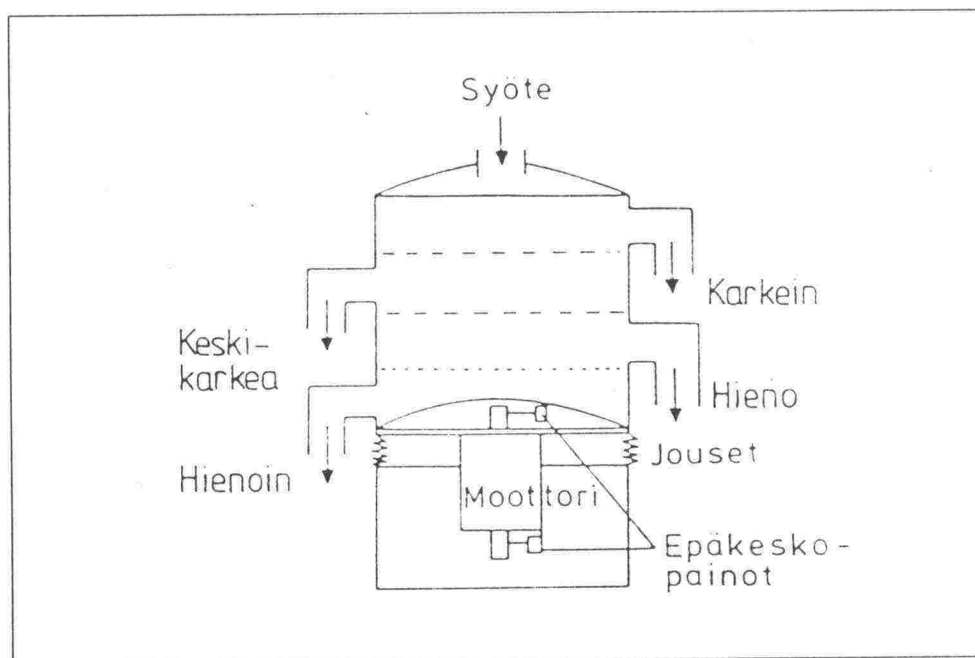


Rumpuseula on akselinsa ympäri pyörivä lieriön tai katkaistun kartion muotoinen seula (kuva 6). Rumpua kallistetaan syöttösuuntaan alaspäin, jotta kiviaines etenisi rummun sisällä. Rumpuseulasta saatavan kiviaineksen jakautumista eri lajitteille voidaan lisätä lisäämällä eri silmäkokoja olevien vaippavyöhykkeiden määrää. Rumpuseulan haittapuolina ovat mm. tukkeutumisherkyys ja pieni kapasiteetti.



Kuva 6: Rumpuseula (Wills 1985).

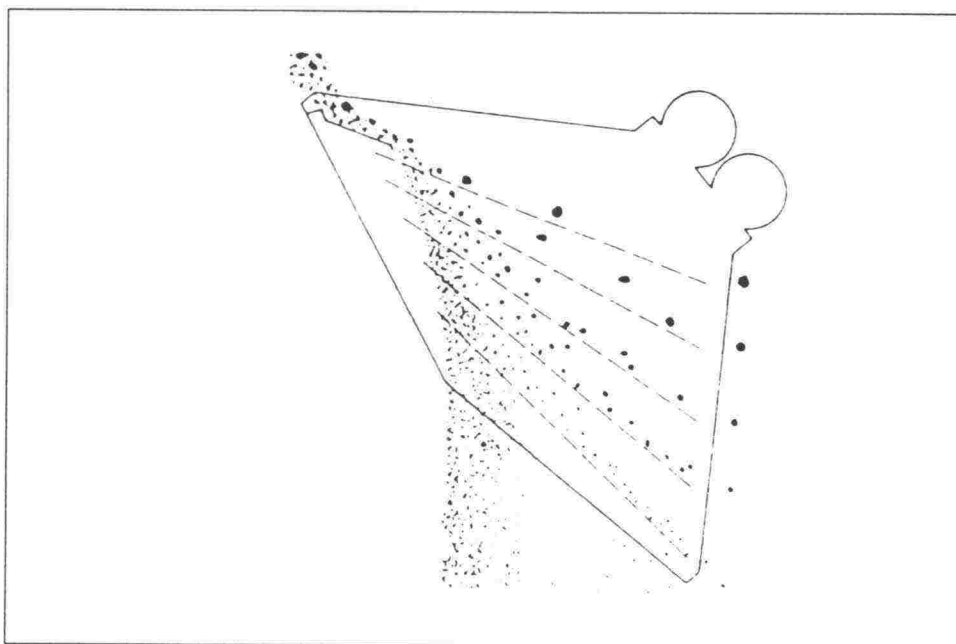
Hyrräseula koostuu yhdestä tai useammasta pyöreästä seulatasosta, jotka liikkuvat sekä vaaka- että pystysuunnassa (kuva 7). Seulottava aine syötetään ylhäältä päin. Eri lajitteet valuvat seulaston sivulla olevista aukoista. Seulojen pintojen tukkeutuminen on pyritty estämään esim. seulojen alle sijoitettujen kumipallojen avulla. Erotusrajana on parhaimmillaan 40 µm.



Kuva 7: Hyrräseula (Wills 1985).

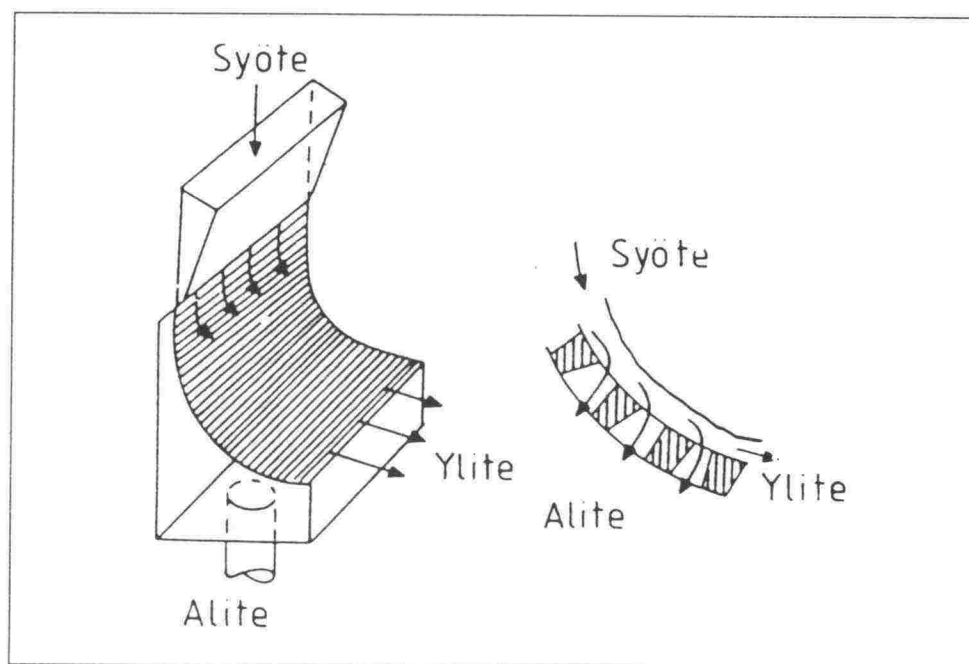


Mogensen-luokitin koostuu 3 - 5 jyrkästä seulatesosta (kuva 8). Kiviaines syötetään ylhäältä. Luokitinta tärytetään epäkeskiöllä tai sähkömagneetillä. Erotusraja on noin 1 mm.



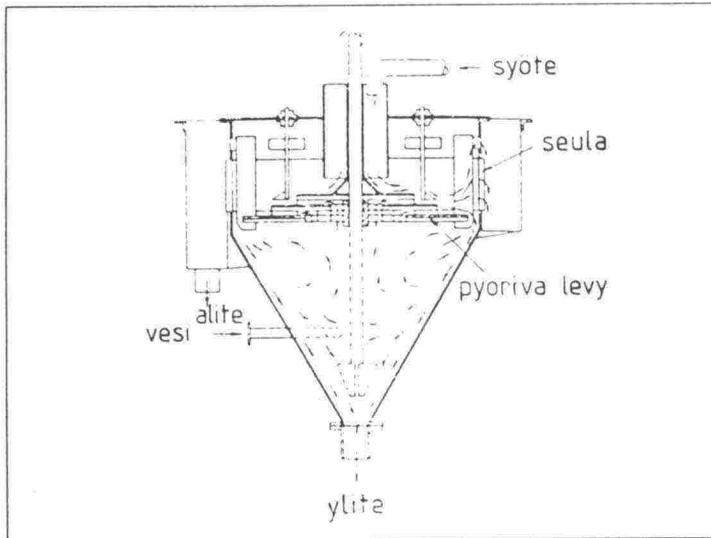
Kuva 8: Mogensen-luokitin (Heikkilä 1986).

Kaariseula on tehty kiviaineesvirtaa vastaan poikittain asennetuista kiinteistä säikeistä, jotka on kiinnitetty kaarevien tukien päälle (kuva 9). Syöttö tapahtuu ylhäältä päin. Seulasäikeiden väli on 0,3 - 1 mm. Seulan kapasiteetti on 7,5 - 120 t/h.



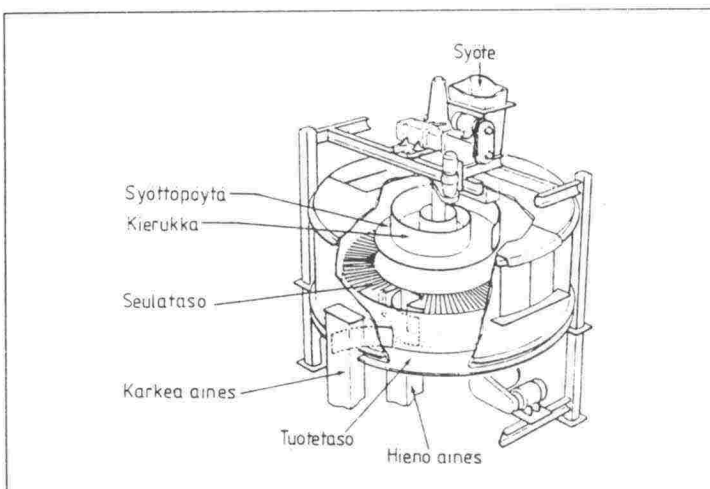
Kuva 9: Kaariseula (Heikkilä 1986).

Hukki-seula koostuu kiinteästä siilosta, jossa on lieriönmuotoinen yläosa ja kartiomainen alaosa (kuva 10). Kiviaines syötetään ylhäältä. Pesuvesi syötetään kartio-osaan. Hienot rakeet kulkeutuvat lieriöosassa olevien lieriönmuotoisten seulojen läpi ja poistuvat alitteena. Karkeat rakeet putoavat alaspäin pitkin kartion seinämiä ja poistuvat kartion kärjen kautta.



Kuva 10: Hukki-seula (Wills 1985).

Pyöröseula on kehitetty poistamaan hienoaainesta eritoten kosteasta kivihiilestä (kuva 11). Pyöröseulaa käytettäessä vältetään käyttämästä pieniä seulakokoja, jolloin tukkeutumisriski pienenee. Seulatasona on pyörivä vaakasuorassa oleva ympyränmuotoinen taso. Seulapinta koostuu ohuista terästangoista. Syötteen tasainen jakaantuminen seulalle saadaan aikaan pyörivällä syötepyydällä, johon on kiinnitetty paikallaan pysyvä kierukka. Molemmat laitteet kerätään pyörivälle tuotetasolle, missä ne pidetään erillään lieriömäisellä väliseinällä. Käsiteltäessä 19 mm raakakivihiiltä 2,4 m seulatason halkaisijalla olevalla pyöröseulalla saadaan kapasiteetiksi 100 t/h. Erotusraja on noin 4 mm.



Kuva 11: Pyöröseula (Wills 1985).

Seulojen toimivuuteen ja kapasiteettiin vaikuttavia tekijöitä ovat mm. (Heikkilä 1986):

Kiviaines

- raekokojakauma
- rakeiden muoto
- kosteuspitoisuus

Seulataso

- kaltevuus
- seulan syöttö- ja purkutasot
- isku (pituus, taajuus, suunta, muoto)

Seulapinta

- materiaali (teräs, kupari, pronssi, nikkeli, kumi, polyuretaani)
- rakenne (verkko/rei'itetty levy, langanmuoto, silmäkoko ja muoto)
- seulan pinta-ala.

#### 2.2.4 Pesu (Heikkilä 1986)

Moreeneissa oleva hienoina on yleensä kiinnittynyt hyvin tiiviisti karkeiden rakeiden pinnoille. Kuiva- ja märkäseulonnoilla ei voida poistaa kuin osa hienoineksesta ja epäpuhtauksista. Kun on tarve jalostaa todella puhdasta kiviainesta, on käytettävä varsinaisia pesumenetelmiä hienoineksen poistamiseksi. Kiviaines on märkäseulontaan verrattuna huomattavasti pitempään veden kanssa tekemisissä. Pesu perustuu sekä rakeiden hankautumiseen toisiaan vastaan että rakeiden hankautumiseen pesulaitteiden osia vasten. Hienoina saadaan poistettua lähes täydellisesti.

Pesun jälkeen karkeasta aineksesta eli varsinaisesta tuotteesta erotetaan vettä esim. varastoimalla. Hienoina puolestaan johdetaan pesuvien mukana jatkokäsittelyyn (luokitus, saostus).

Pesulaitteistot ovat yleensä yksi osa murskaamon (jalostamon) laitteistosta. Pesu on tavallisesti jalostusprosessin viimeinen vaihe. Varsinaiseen pesuprosessiin on tarkoituksenmukaista johtaa vain hienoimmat kiviaines-rakeet. Moreenimurske kannattaa märkäseuloa ennen varsinaista pesua. Pesuun lieene sopivin maksimiraekoko 8 - 16 mm. Karkeampi aine on valmista tuotetta tai tuotteen osa-ainesta. Pesu on hienoineksen jalostusta. Tässä esityksessä tarkastellaan lähemmin erityisesti hienojen rakeiden pesuun parhaiten soveltuvia laitteita.

Pesumenetelmää ja -paikkaa valittaessa on tarkasteltava mm. seuraavia asioita:

- syötteen maksimiraekoko
- syötteen hienoinespitoisuus
- tuotteelta vaadittava hienoinespitoisuus
- laitteiden kapasiteetti; mahdollisuudet toimia murskaamon yhteydessä, kapasiteetit verrattuna murskaamon kapasiteettiin
- laitteiden hankinta- ja käyttökustannukset



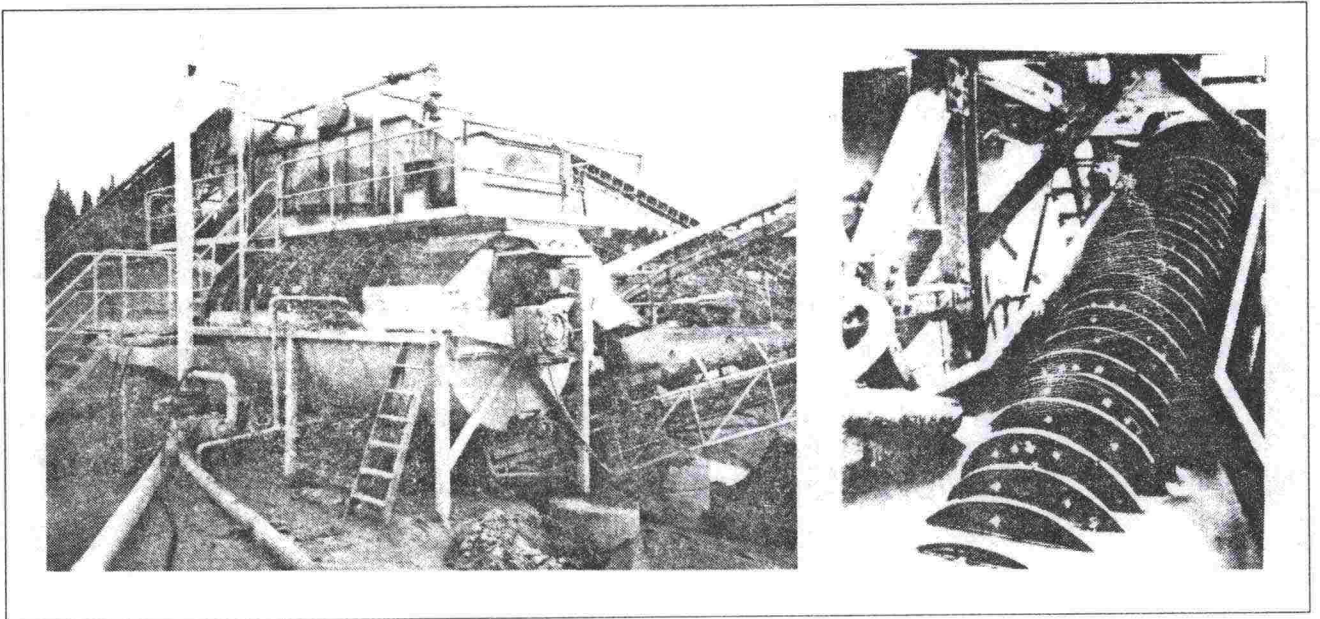
- pesuveden saanti- ja käsittelymahdollisuudet
- laitteistojen siirtomahdollisuudet.

Kiviaineksen pesuun käytettäviä laitteita ovat mm. pesuruuvi, pesurumppu, hydrosykloni ja hierrevalmennin. Tässä esityksessä ei kuitenkaan oteta kantaa eri pesulaitteiden toimivuuteen moreenin jalostuksessa johtuen käytännön tiedon puuttumisesta. Seuraavana on esitelty eri pesulaitteita ja niiden toimintaa.

Pesuruuvi eli "kierukka" koostuu akseliin kiinnitetystä kierteestä, joka pyörii pitkänomaisessa, osittain vedellä täytetyssä sekä kallistetussa kaukalossa (kuva 12). Märkäseulottu kiviaines syötetään kaukalon alaosaan. Kaukalon alapäässä on selkeytinallas, jonka reunan yli liika vesi ja siihen liettynyt hienoaines virtaavat. Ruuvi kuljettaa karkeamman kiviaineksen kaukalon yläosaan ja samalla kiviaines puhdistuu mekaanisen hankauksen ansiosta. Kaukalon yläosassa karkeampi kiviaines putoaa esim. tuotehihnalle. Samalle hihnalle voidaan johtaa myös märkäseulottu karkea aines.

Samassa kaukalossa on yleensä yksi ruuvi, mutta myös kahta ruuvia voidaan käyttää. Ruuvin akselin pituus on 3 - 9 m ja halkaisija on 0,3 - 2,0 m. Yksiakselisen ruuvin kapasiteetti on 5 - 100 m<sup>3</sup>/h ja tehon tarve on 1,5 - 18 kW. Kaksiakselisen ruuvin kapasiteetti on 45 - 170 m<sup>3</sup>/h ja tehon tarve on 15 - 37 kW.

Puhdasta vettä (esim. kaivosta saatavaa pohjavettä) tarvitaan 10 - 20 % kokonaisvesimäärästä. Muu vesi saadaan saostusaltaista.



Kuva 12: Eräitä pesuruuveja (Wills 1985, Heikkilä 1986).

Nopeasti pyörivässä skrubberissa eli rumpupesukoneessa on rummun pyörimisnopeus 70 - 75 % kriittisestä nopeudesta eli nopeudesta, missä kiviaines pyörisi rummun kehällä. Käytettävällä nopeudella kiviaines pysyy

kehällä rummun lakipisteeseen saakka ja putoaa sieltä alas. Lyhyiden ansiosta skrubberissa ei tarvita syöttimiä, vaan kiviaines joutuu rummussa vyörymisliikkeeseen. Kiviaines kulkeutuu eteenpäin sitä mukaa, kun uutta kiviainesta syötetään.

Skrubberi voi työskennellä joko myötä- tai vastavirtaperiaatteella. Myötävirtaisessa mallissa syötetään koneeseen sen toisesta päästä sekä kiviaines että pesuvesi, jotka poistuvat sitten koneen toisesta päästä, kiviaines pestynä omasta reiästään ja vesi lietteineen toisesta.

Vastavirtakoneeseen lisätään osa pesuvedestä koneen poistopäähän, jolloin pestävä kiviaines joutuu ennen poistumistaan hetkeksi vastavirtape-suun. Pesuvesi lietteineen poistetaan koneesta sen syöttöpään päädyssä olevan reikälevyn kautta.

Vastavirtaperiaatetta sovelletaan yleensä ainekseen, jossa on runsaasti hienojakoista ainesta, mitä halutaan vähentää ennen seuraavaan lajitteluvaiheeseen siirtymistä. Hienojakoinen aines näet vähentää pesutehoa, joten sen riittävän aikainen vähentäminen tehostaa prosessia.

Skrubberin poistopää voidaan varustaa rumpuseulaksi, jossa pestävä aines huuhdotaan ja osa hienojakoisesta aineksesta voidaan poistaa ennen lajitteluseulontaa. Tätä skrubberin loppupään seulaosaa ei kuitenkaan pidetä varsinaisesti seulana, koska suuren materiaalivirran vuoksi erottuminen ei ole täydellistä tai yksinään riittävää (Bäcklin 1984).

Pesurumpu eroaa skrubberista pyörimisnopeudessaan, joka on useimmiten vain 40 % kriittisestä. Hitaammin pyörivässä pesurummussa jää vyörymisliikkeen vaikutus vähäisemmäksi, mikä puute korvataan rakentamalla rummut pitemmiksi eli noin 3 - 4 kertaa halkaisijan pituisiksi. Rummun pituuden takia tavara ei kulje itsestään rummun lävitse, vaan siihen on sijoitettava kuljettavia laitteita, jotka joutuvat kovan kulutuksen kohteeksi (Bäcklin 1984).

Pesurumpujen tehot vaihtelevat suuresti; maksimiteho voi olla jopa 350 t/h. Veden tarve on 0,5 - 1,5 m<sup>3</sup> kiviainestonnin kohti. Tehon tarve on 10 - 90 kW.

Hydrosykloni koostuu lieriömäisestä yläosasta ja kartiomaisesta, alaspäin kapenevasta alaosasta (kuva 13). Kiviaines syötetään ylhäältä vaakasuorasti. Yliteputken alareuna ulottuu syöttöaukon alapuolelle oikovirtauksen estämiseksi. Sykloni vuorataan sisäpuolelta kumilla kulumisen estämiseksi.

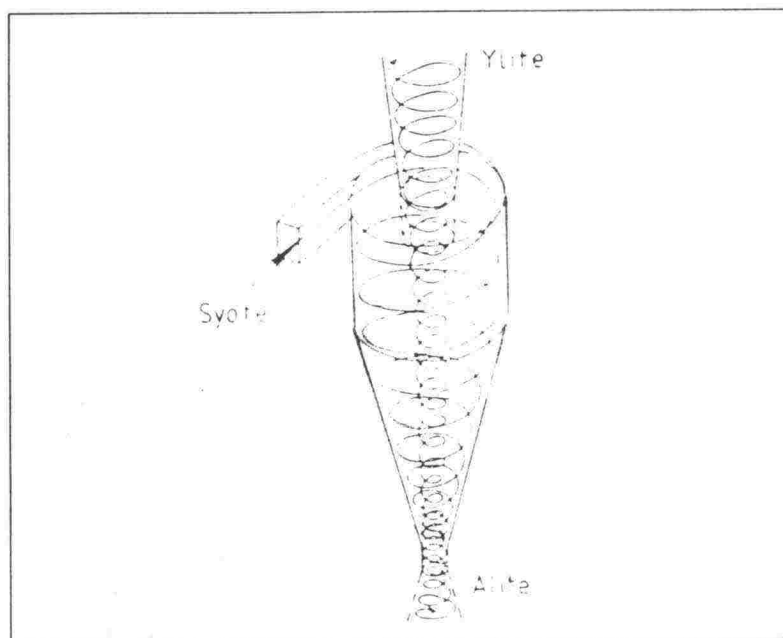
Hydrosyklonissa kiviaines ja vesi joutuvat kierto- ja kiertoliikkeeseen. Karkeat rakeet ajautuvat keskipakovoiman vaikutuksesta kartion reunalle, putoavat alaspäin ja poistuvat kartion alapäästä. Hienoaines ja vesi (ylite) nousevat ylöspäin ja poistetaan syklonin yläpäästä. Rakeet hankautuvat sekä toisiinsa että syklonin seiniä vasten.

Syötteen maksimiraekoko on 5 mm. Suurimpien hydrosyklonien kapasiteetti on peräti 1300 t/h. Veden kulutus on 1 - 15 m<sup>3</sup> kiviainestonnin kohti. Tehon tarve on 1 - 15 kW.

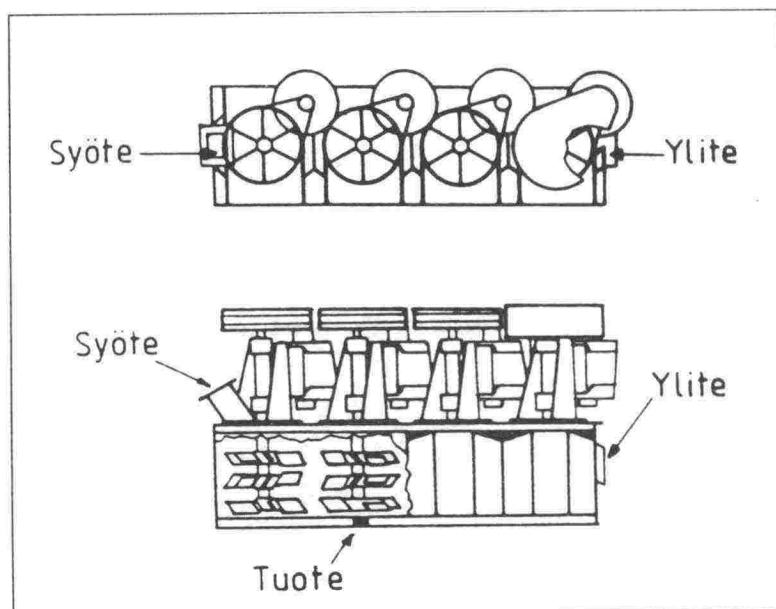


Hierrevalmennin koostuu kulmikkaista säiliöistä (kuva 14), joissa pyöriin pystyakseleihin on kiinnitetty kiviainesta sekoittavia potkureita. Kiviaines puhdistuu mekaanisen hankauksen ansiosta.

Hierrevalmennin on tarkoitettu todella hienojen rakeiden erottamiseen. Kiviaines on tarkoituksenmukaista pestä ensin jollakin toisella pesulaitteella - esim. pesuruuvilla. Syötteen maksimiraekoko on 6 mm. Yhden valmentimen kapasiteetti on noin 30 t/h, kun kiviaineksen käsittelyaika on yksi minuutti. Kapasiteetin kohottamiseksi voidaan käyttää useampaa valmenninta joko sarjassa tai rinnan.



Kuva 13: Hydrosyklonin toimintaperiaate (Heikkilä 1986).



Kuva 14: Hierrevalmennin (4 säiliötä) (Heikkilä 1986).

Hierrevalmentimet ovat kevyitä ja pienikokoisia. Sekoitusnopeus on 180 - 200 kierrosta/min. Tehon tarve on 11 kW. Hydrosyklonin ja hierrevalmentimen yhdistelmällä syötteen 30 % savipitoisuus on saatu käytännössä puutoamaan aina 0,5 % asti.

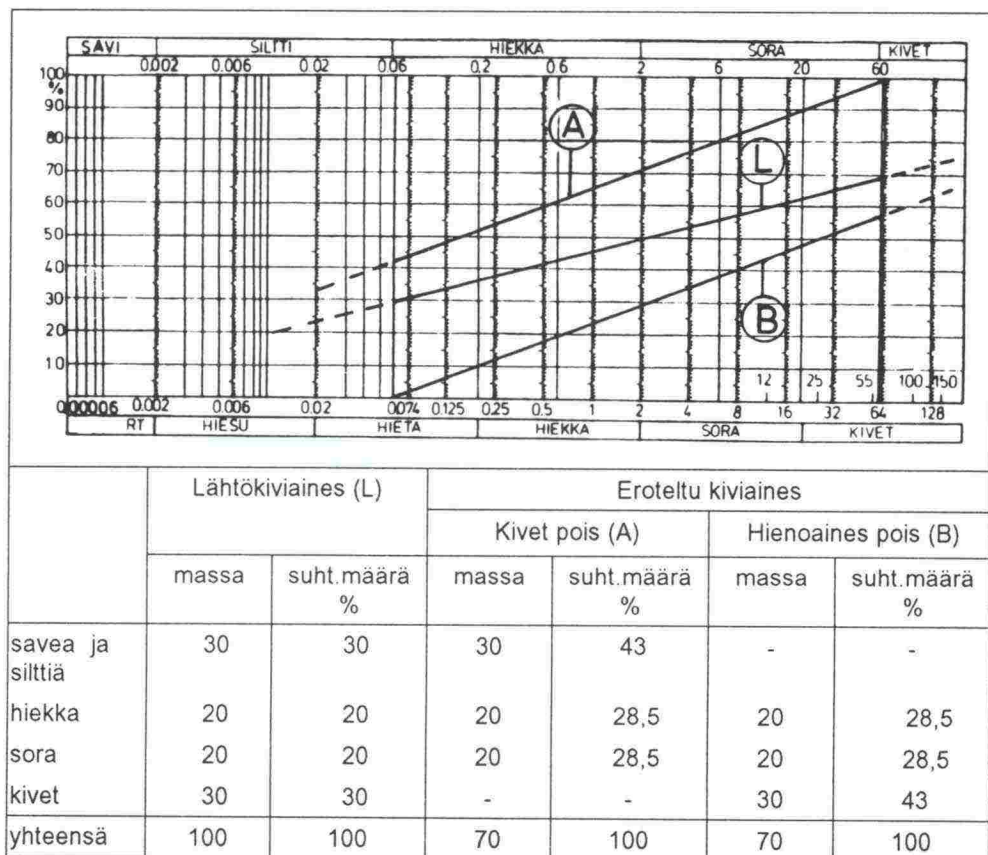
## 2.2.5 Erottelun vaikutus moreenin raekokojakaumaan

Erottelun avulla voidaan käsiteltävästä kiviaineksesta poistaa joko liian suuret kivet tai ylimääräinen hienoaines. Kuvassa 15 on esitetty esimerkinomaisesti, miten erottelu vaikuttaa kiviaineksen (L) raekokojakaumaan, kun

- lähtökiviaineksesta poistetaan kivet (A),
- lähtökiviaineksesta poistetaan hienoaines (B).

Erottelun vaikutuksesta raekokojakaumaan voidaan yleistäen sanoa, että erotettaessa kiviaineksen karkein materiaali pois, lisätään hienoaineksen suhteellista määrää. Vastaavasti erotettaessa hienoin materiaali pois, lisätään karkean aineksen suhteellista määrää.

Käytännössä erottelun vaikutuksia voidaan arvioida, kun tiedetään lähtökiviaineksen rakeisuuskäyrä ja erotettavan kiviaineksen määrä (%). Tällöin voidaan edellä esitetyn esimerkin mukaisesti hahmotella saatavan kiviaineksen rakeisuuskäyrä.



Kuva 15. Periaatekuva erottelun vaikutuksesta raekokojakaumaan  
(L = lähtökiviaines, A = kivet poistettu, B = poistettu hienoaines).

### 2.3 Sekoitus (Jorma Heikkilä 1986)

Sekoittamalla eri jalostustuotteita tai jalostustuotteita ja luonnonaineksia toisiinsa voidaan saada aikaan parempi lopputuote. Sekoittamisen avulla voidaan myös paremmin hyödyntää huonolaatuisia aineksia kuin ilman sekoituksia.

Suunniteltaessa sekoittamista tulee lopputuotteen ominaisuuksien olla parempia kuin lähtötuotteiden, jotta sekoittaminen yleensä kannattaisi. Sekoittamisen lähtökohtana ovat sekoitettavien aineiden rakeisuuskäyrät. Valitsemalla sopiva sekoitussuhde, esim. 1:1, 1:2, 1:3, voidaan lopputuotteen rakeisuuskäyrä saada halutunlaiseksi eli lähelle käyttökohteessa vaadittua optimirakeisuusjakaumaa.

Yleensä riittää kahden ainesosan sekoittaminen. Kahden ainesosan sekoitusyhdistelmiä, joissa toisena ainesosana on moreeni, ovat mm.:

- moreeni + sora
- moreeni + kallioulouhe
- moreenimurske + soramurske
- moreenimurske + louhemurske
- moreenimurske + kivimurske.

Jalostamattomia maa-aineksia voidaan sekoittaa esim. esimurskaimen syöttimellä. Sekoittaminen tapahtuu syöttämällä samanaikaisesti molempia maa-aineksia. Tavoitteena on saada maa-ainekset sekoittumaan syöttimellä. Lopputuotteen tasalaatuisuuden takaamiseksi on kuitenkin suositeltavampaa sekoittaa valmiita murskeita kuin jalostamattomia maa-aineksia. Murskeita voidaan sekoittaa mm. seuraavissa paikoissa/seuraavin tavoin:

- sekoittimella
- siilossa ja hihnakuljettimella
- varastoinnin yhteydessä
  - \* kasaa tehdessä
  - \* kuormattaessa kasoista
- tien rakennekerroksia tehtäessä.

Sekoittimen käyttö murskaamon yhteydessä takaisi varman ja tasaisen sekoittumisen. Käytettäessä siiloa ja hihnakuljetinta on parasta menetellä niin, että moreenimurske liikkuu hihnalla ja siilosta pudotetaan hihnalle sekoitettava murske. Moreenimurske on näet muita murskeita herkempää holvautumaan siilossa. Jos sekoittamiseen käytetään kahta hihnakuljetinta, on sekoittamispisteessä syytä käyttää rakennelmaa, jossa ohjauslevyjen avulla estetään kiviaineksen vapaata liikettä sekä pysty- että sivusuunnassa.

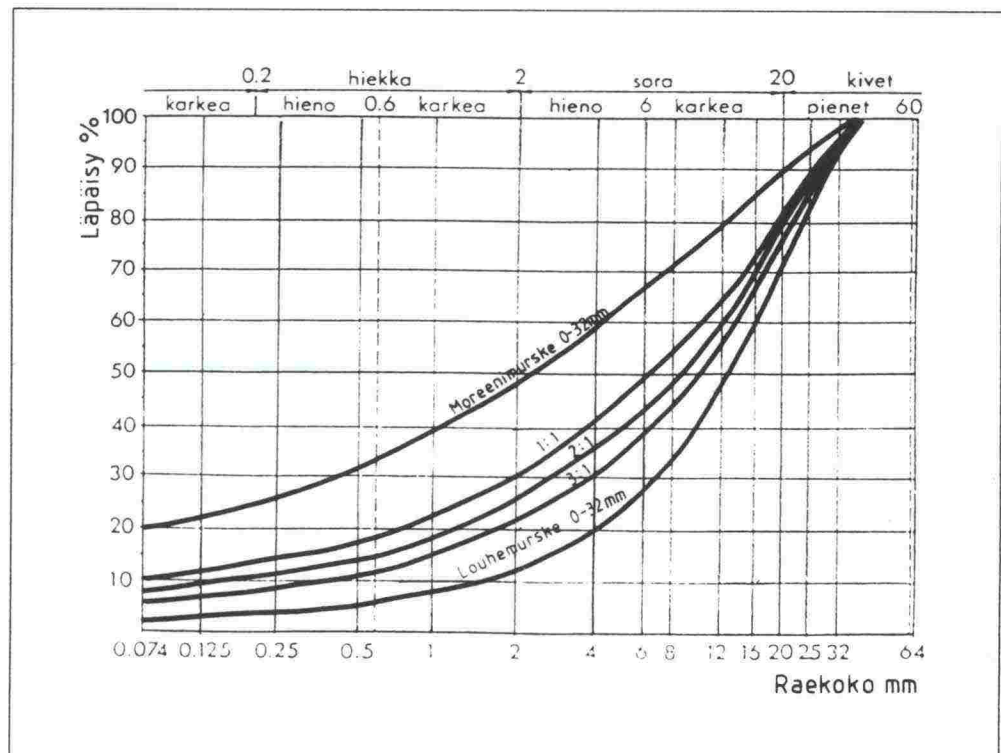
Varastokasassa murskeita voidaan sekoittaa läjittämällä sekoitettavia aineksia vuorotellen. Myös vierekkäin olevista kasoista kuormattaessa on sekoittaminen mahdollista. Vielä tierakenteessakin murskeita voidaan yhdistää: sekoitettavia aineksia tuodaan vuorotellen ja levityskoneella yritetään sekoittaa ne keskenään.



Sekoitusmerkinä voitaisiin mainita louhemurskeen 0 - 32 mm ja morenimurskeen 0 - 32 mm sekoittaminen suhteessa 2:1 (louhetta 2 osaa ja moreenia 1 osa). Tällöin saadaan korjattua louheen riippuvaa käyrää ylöspäin ja morenimurskeen rakeisuuskäyrää hienoineksen osalta laskettua alaspäin ohjekäyrien mukaiseksi (kuva 16).

Morenimurskeen (varsinkin runsaasti hienoineesta sisältävän) sekoittamisella johonkin karkeampaan murskeeseen saatavia etuja ovat:

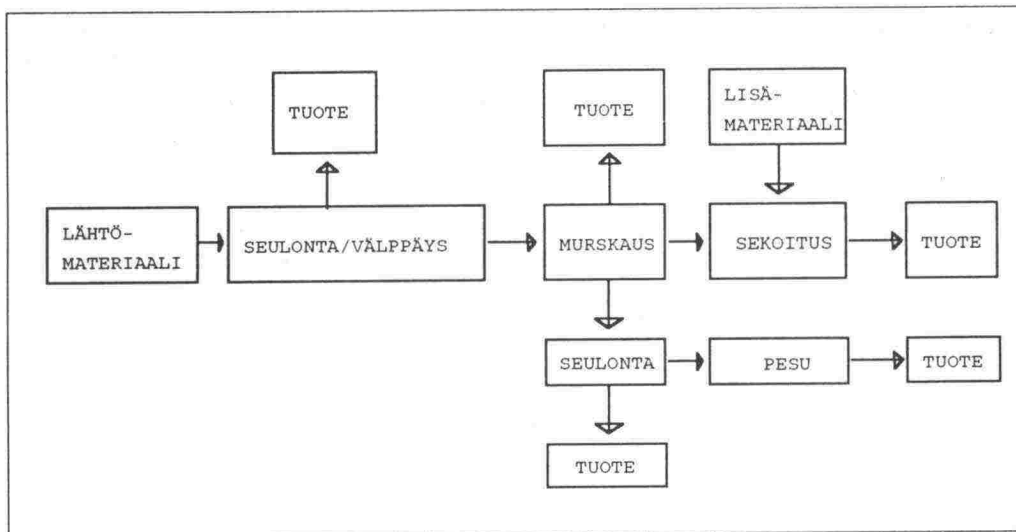
- routivuuden pieneminen tai kokonaan poistuminen
- kantavuuden parantuminen (varsinkin kevätkantavuus)
- veden vaikutuksen pieneminen: stabiliteetin, kantavuuden ja käsiteltävyyden säilyminen veden lisääntyessä
- materiaali soveltuu paremmin sementti- ja bitumi-stabilointiin.



Kuva 16: Morenimurskeen 0 - 32 mm ja louhemurskeen 0 - 32 mm sekoittaminen (Heikkilä 1986).

## 2.4 Yhteenveto moreenin mekaanisesta jalostuksesta

Mekaanisessa jalostuksessa moreenin raejakauma saadaan paremmin vastaamaan käyttöolosuhteiden vaatimaa raekokojakaumaa. Jalostuksella voidaan poistaa kokonaan tai osittain jalostamattoman moreenin käytössä mahdollisesti esiintyviä haittatekijöitä, kuten routivuutta ja heikkoa kantavuutta sekä huonoa käsiteltävyyttä märkänä. Moreenin mekaaninen jalostaminen on käytännön tilanteissa varteen otettava vaihtoehto suunniteltaessa tiemateriaalin hankintaa. Kuva 17 on kaavio mekaanisen jalostuksen menetelmistä ja jalostusprosessista.



Kuva 17: Kaaviokuva mekaanisesta jalostuksesta.

### 2.4.1 Murskaus

Tielaitoksen ohjeiden mukaan murskattua moreenia voidaan käyttää jakavassa ja eristyskerroksessa sekä soratien kulutuskerroksessa. Murskauskelpoisen moreenin tulee olla mahdollisimman kivistä. Yli 64 mm:n suuruisia kiviä ja lohkareita tulisi olla vähintään 25 %. Hienoainesmäärä (raekoko alle 0,074 mm) voi vaihdella 10 - 20 %:n välillä 0 - 65 mm seulontakäyrällä. Mitä runsaskivisempää moreeni on, sitä suurempi voi myös hienoainespitoisuus olla.

Murskauksen avulla saadaan moreenissa olevat kivet haluttuun raekokoon ilman, että hienoainespitoisuus merkittävästi kasvaa. Toisin sanoen murskatun moreenin hienoainesprosentti on suurin piirtein sama kuin iso-seulonnassa (rakeisuuskäyrässä mukana myös kivet) saatu lähtökiviaineksen hienoainesprosentti. Hienoaineksen määrän vähentämiseksi tulee murskausprosessiin liittää seulonta. Kun hienoaineksen erottaminen tehdään ennen murskausta, voidaan samalla parantaa murskaamon tehoa ja vähentää murskainten leukojen kulumista.

Moreenin murskaukseen soveltuvat seuraavanlaiset murskaamot:

- tavalliset, pienet murskaamot
- tavalliset, isot murskaamot
- liikkuvat (Mertsä-tyyppiset) murskaamot.

Taulukko 2: Murskainten vertailua.

	Edut	Varjopuolet
Isot murskaimet	Voidaan murskata isoja kiviä. Suuri tuotto. Tasalaatuista mursketta.	Työläs siirtää. Esiintymän koko yli 10 000 m <sup>3</sup> .
Pienet murskaamot	Helpompi siirtää kuin isot murskaamot.  Voidaan hyödyntää pienem- piä esiintymiä kuin isoilla murskaamoilla.  Tasalaatuinen murske.  Halvempi kuin isot murskaa- mot.	Enemmän esirikottavia kiviä kuin isoilla murskaamoilla.  Pienempi tuotto kuin isoilla murskaamoilla.
Liikkuvat murskaimet	Joustavuus ja helppo mu- kauttaa vaihteleviin olo- suh- teisiin. Voidaan hyödyntää pienetkin esiintymät jopa alle 2000 m <sup>3</sup> .	Epätasainen murskeen laa- tu. Pienehkö tuotto 50 - 70 m <sup>3</sup> /td.

## 2.4.2 Erottelu

Välppäyksen, seulonnan ja pesun avulla voidaan lähtökiviaineksesta erot-  
taa joko kivet tai hienoaines pois. Jos erotetaan kivet pois, kasvaa hienoai-  
neksen suhteellinen määrä. Vastaavasti erotettaessa hienoaines pois, kas-  
vaa karkean aineksen suhteellinen määrä. Laskennallisesti voidaan arvioi-  
da, miten erottelu muuttaa lähtökiviaineksen rakeisuuskäyrää. Laskennas-  
sa tarvittavia tietoja ovat eroteltavalle kiviainekselle isoseulonnalla määri-  
tetty rakeisuuskäyrä ja poistettavan kiviaineksen raekoko ja määrä.

### Välppäys

Välppäys soveltuu erinomaisesti erottamaan ylisuuret kivet murskauksen  
yhteydessä. Välppäyskiskojen keskinäisestä etäisyydestä riippuen saadaan  
maa-ainesta 0 - johonkin (0 - 65 mm, 0 - 100 mm, 0 - 200 mm jne.)

### Seulonta

Moreenin seulontaan tavallisista seuloista parhaimpia ovat seulat, joissa  
on tärytys ja kalteva seulapinta. Pitkäaukkoinen ja ohutlankainen seula-  
verkko on todettu hyväksi. Polyesteri- ja kumilankojen seulontateho ja  
kestävyys on parempi kuin teräslankojen. Kuivaseulonnassa erotusrajana  
on 8 mm ja märkäseulonnassa 1 - 2 mm. Käytettävissä olevia erikoisseuloja  
on esitetty taulukossa 3. Eri erikoisseulojen toimivuudesta moreenin seu-  
lonnassa ei ollut käytettävissä käytännön tietoa kirjallisuusselvitystä tehtä-  
essä.



Taulukko 3: Eräitä erikoisseuloja ja niiden ominaisuuksia.

	Erotusraja	Kapasiteetti	Huom.
Rumpuseula	Riippuu seulan silmäkoosta (4 - 8 mm).	Pieni	Tukkeutumisherkkä. Saadaan useita lajitteita.
Hyrräseula	40 µm	-	Saadaan useita lajitteita.
Mogensen-luokitin	1 mm	-	Saadaan useita lajitteita.
Kaariseula	0,3 - 1 mm	7,5 - 120 t/h	Erottaa vain karkean ja hienoaineksen.
Hukki-seula	Riippuu seulan silmäkoosta (1 - 4 mm).	-	Erottaa vain karkean ja hienoaineksen.
Pyöröseula	4 mm (8 mm)	100 t/h	Ei tukkeutumisherkkä. Erottaa vain karkean ja hienoaineksen.

### Pesu

Pesussa hienoaines saadaan poistetuksi lähes kokonaan, joten pesussa saadaan puhtaampi kiviaines kuin kuiva- ja märkäseulonnassa. Pesu on tavallisesti jalostusprosessin viimeisimpiä vaiheita. Moreenimurskeen sopivin lajite pesuun lieenee alle 8 - 16 mm raekoon kiviaines. Hienoaineksen pesuun käytettäviä laitteita on esitetty taulukossa 4. Eri pesulaitteiden käytökelpoisuudesta moreenin jalostamiseen ei ole otettu kantaa johtuen käytännön tiedon puuttumisesta.

Taulukko 4: Eräitä pesulaitteita ja niiden ominaisuuksia.

	Veden tarve	Kapasiteetti	Tehon tarve	Huom.
Pesuruuvi	5 - 100 m³/h	5 - 100 m³/h	1,5 - 18 kW	-
Pesurumpu	0,5 - 1,5 m³	50 - 350 t/h	10 - 90 Kw	-
Hydrosykloni	1-15 m3	1300 t/h	1 - 15 Kw	Syötön max.raekoko
Hierre-valmennin	-	30 t/h	11 Kw	Todella hienojen rakeiden erottamiseen. Syötteen max.raekoko 6 mm.

### 2.4.3 Sekoitus

Sekoituksella voidaan muuttaa moreenin raejakaumaa. Sekoituksen lähtökohtana on, että sekoituksessa saatavan materiaalin ominaisuudet ovat paremmat kuin kummankaan lähtömateriaalin. Yleensä kahden ainesosan sekoittaminen on riittävä. Käytettäviä sekoitusyhdistelmiä ovat mm:

- moreeni + sora
- moreeni + kallioulouhe
- moreenimurske + soramurske
- moreenimurske + louhemurske
- moreenimurske + kivimurske.

Murskeita voidaan sekoittaa mm. seuraavissa paikoissa/seuraavin tavoin:

- sekoittimessa
- siilossa ja hihnakuuljettimella
- varastoinnin yhteydessä
  - \* kasaa tehtäessä
  - \* kuormattaessa kasoista
- tien rakennekerroksia tehtäessä.

Sekoituksen vaikutusta raekokojakaumaan voidaan tarkastella esimerkinomaisesti kuvasta 16 (sivu 29).

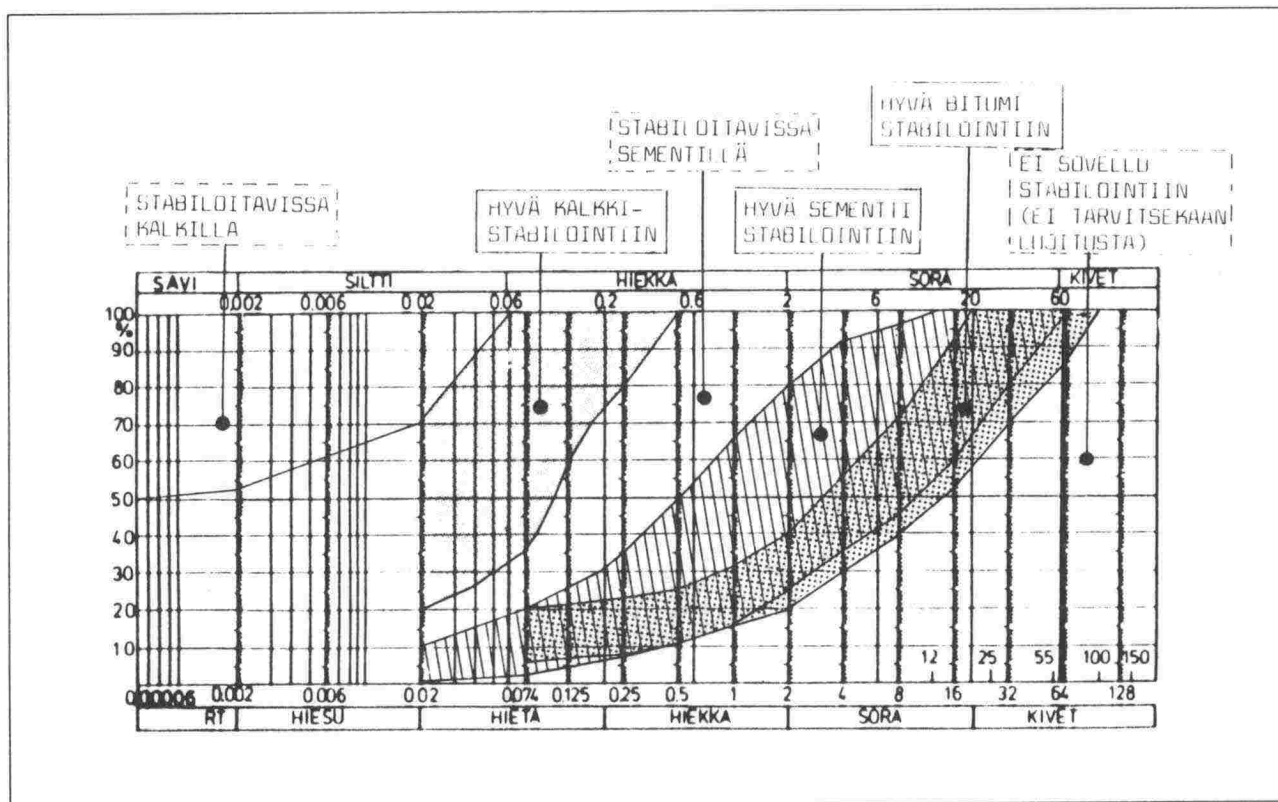
### 3 STABILOINTI

#### 3.1 Yleistä

Stabiloinnilla lisätään maa-ainesten kantavuutta ja vähennetään routimista. Teiden parantamisessa stabilointi on vartenotettava vaihtoehto. Tiessä jo olevien maa-ainesten ominaisuuksia voidaan parantaa tiellä. Maa-ainesvaroja säästetään.

Moreenit soveltuvat hyvin stabilointiin. Moreenien huonoja ominaisuuksia, routimisherkkyttä ja heikkoa kantavuutta märkänä, voidaan parantaa tavallaan keinotekoisesti. Moreenit stabiloidaan tavallisesti sementillä. Myös bitumisia sideaineita ja kalkkia voidaan käyttää. Teollisuuden sivutuotteita (esim. masuunikuonajauhe ja lentotuhka) voidaan käyttää osasideaineena.

Kuvassa 18 on esitetty eri stabilointiaineiden soveltuvuusalueet kiviaineksen rakeisuuden perusteella.



Kuva 18: Stabilointikiviainesten ohjealueet.

Savi ja siltti ovat vaikeasti sekoitettavia sementin kanssa johtuen saven ja siltin velliintymisestä tai paakkumaisuudesta. Lisäksi tarvittava sementtipitoisuus on niin suuri, ettei ratkaisu ole yleensä kannattava. Myös hienoainesta runsaasti sisältävien maiden bitumistabiloinnissa nousee tarvittava sideainepitoisuus niin suureksi, ettei se ole kannattavaa. Toisaalta on muistettava, että hienoainespitoisuutta voidaan vähentää mekaanisen jalostuksen keinoin. Stabilointia suoritettaessa alkuperäisen materiaalin



"käyrän korjaaminen" sekoittamalla toista materiaalia (karkeampaa tai hienompaa) tapahtuu helpoimmin stabilointisekoituksen yhteydessä.

Parhaiten sementti ja bitumi soveltuvat karkeampien ainesten stabilointiin. Kalkki taas soveltuu parhaiten runsaasti hienoainesta sisältävien maa-ainesten stabilointiin. Moreeneja stabiloitaessa sementti ja bitumi soveltuvat parhaiten karkearakeisten moreenien (SrMr ja HkMr) stabilointiin, kun taas kalkki soveltuu runsaasti hienoainesta sisältävien vähäkivisten moreenien stabilointiin (SiMr ja hkSiMr).

Moreenin stabiloinnissa käytettävä kiviaines voi olla moreenia tai moreenimursketta. Myös muita murskeita sekoitettuna edellisiin tiellä tai sekoitusasemalla saattaa tapauskohtaisesti olla tarpeellista käyttää. Tällöin saadaan moreenin rakeisuuskäyrä paremmin sopimaan kulloinkin käytetyn stabiloinnin suositellulle rakeisuusalueelle. Stabiloitava kiviaines saadaan ottopaikasta, murskekasasta tai tien pinnasta.

Stabiloidun tien tasaisuuden takaamiseksi myös pitkällä tähtäimellä tulee suurta huomiota kiinnittää ennakkokokeisiin ja suunnitelman yksityiskohtaisuuteen. Lähtökantavuuden erot tien pituus- ja poikkisuuntaan tulee tietää riittävällä tarkkuudella. Tällöin vahvistamistoimet voidaan kohdistaa juuri tarpeellisiin kohtiin. Suunnitelmassa ja rakentamisessa voi käyttää hyväksi menetelmän joustavuutta; stabilointisyvyyttä kuten myös sideainemäärää voidaan säätää portaattomasti. Näin kantavuuserot saadaan mahdollisimman pieniksi. Kantavuuserot eri rakenteiden saumoissa tulee tasoittaa siten, että stabilointia ei aloiteta jyrkästi täydestä syvyydestä huonoksi todetulla tieosuudella, vaan se aloitetaan ja lopetetaan kantavammalla osuudella.

Käytettävät koneet ja laitteet asettavat pohjamaalle tiettyjä rajoituksia. Koneiden tulee pystyä liikkumaan ja tekemään vaadittu työnsä. Stabilointijyrsimen on pystyttävä mahdollisen murskelisäyksen jälkeen liikkumaan alustalla ja jyrsimään vaadittu kerrospaksuus. Jyrsimet ovat useimmiten pyöräalustaisia, mikä lisää pohjan kantavuusvaatimuksia. Tierakennetta vahvistettaessa on kiinnitettävä erityistä huomiota siihen, että tien reunan kantavuus on riittävä ja että se on tiivistetty hyvin. Muuten on vaarana jyrsimen viettäminen.

Stabiloidulle kerrokselle saatava kantavuus riippuu ko. kerroksen alla olevien rakenteiden kantavuudesta. Pehmeällä alustalla stabiloitua rakennetta ei saada tiivistetyksi tarpeeksi, mikä johtaa jälkitiivistymiseen. Jos lähtötaaso on hyvin alhainen, olisi harkittava stabilointia kahteen kertaan: ensiksi laihempi ja sen jälkeen lopullinen vahvistuskerros. Koneet pystyvät siten liikkumaan ja tiiviysaste saadaan hyväksi.

Stabiloinnilla vähennetään sitomattomien kerroksien hienoainesta sitomalla partikkeleita toisiinsa. Samalla stabilointi vähentää hienonemisesta johtuvaa urautumista. Stabiloinnilla saadaan rakenne kestämaan pitempään.

Pohjamaan vaihteluiden vuoksi tien kantavuuserot voivat olla suuria tien pituus- ja poikittaissuunnassa. Stabiloinnilla saadaan em. kantavuusvaihteluita tasoitetuksi ja tien ajettavuus säilytettyksi suunnitellulla tasolla.

## 3.2 Sementtistabilointi

### 3.2.1 Sementtistabiloinnin perusteet

Maa-ainesten sitomisesta sementillä käytetään yleisnimitystä sementtistabilointi. Sementtistabiloinnissa sideaine sitoo ja liimaa kiviainesrakeet toisiinsa ja saa aikaan tierakenteen lujittumisen. Kiviaines karkeutuu ja rakeiden ominaispinta-ala pienenee. Eri sideainepitoisuuksilla stabiloinnin vaikutus painottuu joko routivuuden vähentämiseen tai rakenteen kantavuuden lisäämiseen.

Tielaitos on julkaissut vuonna 1992 koekäyttöön tarkoitetun uuden sementtistabilointiohjeen (ISBN 951-47-6848-5, TIEL 2222614) ja siihen liittyvän työselityksen ja laatuvaatimukset vuonna 1993 (ISBN 951-47-7426-4, TIEL 2211464-93). Em. sementtistabilointiohje jaottelee sementillä lujitetut rakenteet käytettävän sementtimäärän perusteella seuraavasti:

- laiha maabetoni
- maabetoni
- jyräbetoni.

Riippuen siitä, pyritäänkö parantamaan moreenikerroksen routivuusominaisuuksia vai kantavuutta, voidaan puhua joko stabiloidusta kerroksesta tai maabetonikerroksesta. Tässä raportissa käytettävä ilmaisu *stabiloitu kerros* vastaa sementtistabilointiohjeen ilmaisua *laiha maabetoni*. Tällöin maabetoni mielletään korkealuokkaiseksi stabiloinniksi. Brysselissä vuonna 1987 pidetyssä tiekongressissa ehdotettiin käytettäväksi termiä maabetoni, kun rakennettava kerros on päällysrakenteen osaksi mitoitettu kerros (Rahiala 1988). Maabetonikerrokselle tunnusomaisia piirteitä ovat:

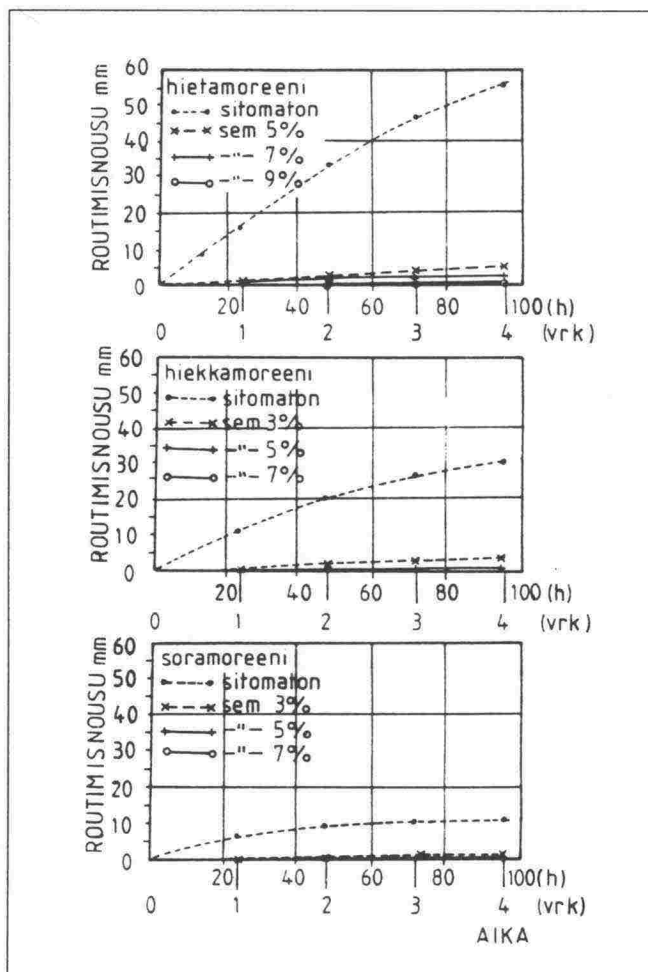
- sijoittuu jakavaan tai kantavaan kerrokseen
- mitoitettu ja rakennettu niin, että ko. kerroksen lujuusominaisuudet voidaan luotettavasti hyödyntää
- lujuusvaatimuksesta johtuen kiviaineksen rakeisuudelle, homogeenisyydelle ja humuspitoisuudelle asetetaan vaatimuksia
- kerros halkeilee vapaasti (ei saumoja).

Stabilointikerrostermiä ehdotettiin käytettäväksi, kun rakennettava kerros sijoittuu päällysrakenteen alimmaisii kerroksiin tai päällysrakenteen alle. Stabiloidulle kerrokselle ominaisena voidaan pitää seuraavia piirteitä:

- sijoittuu päällysrakenteen alimmaisii kerroksiin tai päällysrakenteen alle
- pyritään parantamaan maan routivuus- ja kantavuusominaisuuksia
- saatua lujuuden lisäystä ei voida käyttää kantavuusmitoituksessa hyväksi (lujuuden lisäys pieni)
- ei aseteta erityisiä vaatimuksia käytettävälle materiaalille
- halkeilua ei huomioida (ei merkitystä).



Moreenin routiminen vähenee olennaisesti pienillä sideainepitoisuuksilla (2 - 3 %). Routanousukokeissa on todettu, että sora- ja hiekkamoreenin routanousut ovat 3 %:n sementtipitoisuudella hyvin pieniä (kuva 19). Routimisen vähentyessä paranee myös tierakenteen kantavuus. Jo 4 %:n sementtipitoisuudella on saavutettu kohtuullisen hyviä puristuslujuuksia (Meriläinen 1986).



Kuva 19: Moreenin routanousukokeiden tuloksia (Taivainen 1973).

Pieniä sementtipitoisuuksia (1 - 2 %) voidaan käyttää varastoitavan moreenin ja moreenimurskeen stabiilisuuden ja käsiteltävyyden parantamiseen. Etukäteen sementillä stabiloitu ja löyhässä tilassa säilytetty moreenimurske käyttäytyi tiivistysominaisuuksiensa suhteen kuten kalkilla stabiloitu materiaali. Sen optimivesipitoisuus kasvaa ja maksimikuivatilavuuspaino alenee puhtaaseen moreenimurskeeseen verrattuna.

Jari Nousiaisen laatimassa tutkimusraportissa todettiin, että löyhässä tilassa kuukauden ajan säilytetyn stabiloidun moreenin lujuus kasvoi tiivistyksen jälkeen. Puristuslujuudet mitattiin heti ja 7 vrk tiivistyksen jälkeen. Lujuus kasvoi noin nelinkertaiseksi. Lujuuden kasvu johtui siitä, että sementissä tapahtui lujittumisreaktioita vielä tiivistyksen jälkeenkin. Ilmeisesti kauemmin, esim. 3 kuukautta varastoidun materiaalin puristuslujuus ei

saavuta enää kokeessa saatuja arvoja, koska lujittumisreaktiot on käyty oleellisimmilta osiltaan loppuun. Siten, jos kiviaineksen ominaisuuksien parantamisen lisäksi halutaan saada lujuutta, voisi sopiva varastointiaika olla noin kuukausi ennen rakentamista (Nousiainen 1989).

Sideainepitoisuuden noustessa stabiloinnin vaikutus painottuu kantavuuden kohottamiseen. Tavallisesti 4 - 6 %:n sideainepitoisuus on riittävä vähähumuksisilla moreeneilla. Ko. sideainepitoisuuksilla saavutetaan yleensä puristuslujuus 3 - 6 MN/m<sup>2</sup> seitsemän vuorokauden ikäisenä. Suuremmilla sideainepitoisuuksilla puristuslujuudet ja kantavuudet ovat tarpeettoman suuria ja halkeamien syntymistodennäköisyys kasvaa (Heikkilä 1986).

Sementtistabiloinnissa lujitettava maa-aines ei yleensä ole betonisoran kaltaista suhteistunutta kiviainesta ja sementtipitoisuus on huomattavasti pienempi kuin betonimassassa. Stabiloinnissa ei siten saada aikaan täydellistä tiivistymistä ja ilmahuokospitoisuus jää tiivistyksestä ja rakeisuudesta riippuen 3 - 15 %:iin. Betonin tyhjätila on 1 - 2 %. Sementtiliima ei siis täytä kokonaan huokosia eikä peitä kiviainesrakeita täydellisesti, vaan rakeet sitoutuvat toisiinsa pistemäisesti (Lindgren 1980).

Sementtiliiman kuivuessa syntyy stabiloituun maahan hiushalkeamia, minkä seurauksena rakenne ei ole jäykkä vaan taipuisa. Stabiloidun maan lujuus ei perustu suoraan sementin lujuuteen kuten betonissa, vaan sementin aiheuttaman sisäisen kitkakulman ja koheesion kasvuun maarakeiden välillä (Lindgren).

Johtuen rakeiden pistemäisestä kiinnittymisestä voi maabetonin pitkänajan kestävyys ehkä laskea huomattavasti alkulujuutta pienemmäksi, kun osa rakeiden välisistä kiinnityksistä vähitellen murtuu.

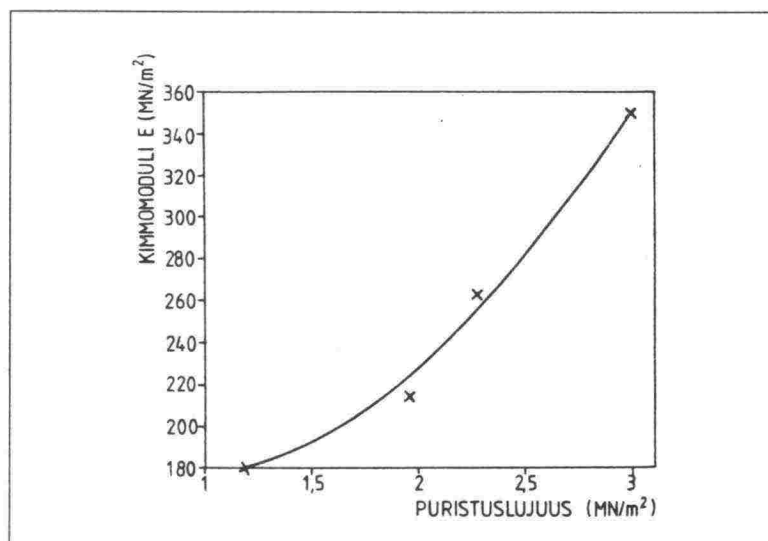
Tärkeimpiä lujuuteen vaikuttavia tekijöitä sementtistabiloinnissa ovat:

1. Vesi ja vesipitoisuus
2. Sementtipitoisuus
3. Kuivairtoteisyys
4. Materiaalin hienoainespitoisuus ja rakeisuus
5. Materiaalin humuspitoisuus
6. Lisäaineet
7. Aika ja lämpötila

- 1) Vesipitoisuus vaikuttaa stabiloinnin onnistumiseen siten, että jos vesipitoisuus on liian suuri, jää maan tiivistyminen vaillinaiseksi. Veden poistuessa jää huokostila suureksi ja rakeiden kosketuskohtien pinta-ala pieneksi. Jos vettä taas on liian vähän, ei sementin hydratoituminen tapahdu kokonaan, vaan se jää vaillinaiseksi.

Stabilointiin käytettävä vesi ei saa sisältää klorideja enempää kuin 0,03 painoprosenttia. Suomalaisen meriveden käyttö on sallittua sementtistabilointiin. Humuspitoista pintavettä ei saa käyttää (Sementtistabilointiohje 1992). Teollisuuslaitosten saastuttamaa vettä tulisi välttää, sillä epäpuhtaudet alentavat puristuslujuutta ja lisäävät siten tarvittavaa sementtipitoisuutta (Lindgren 1980).

- 2) Sementtipitoisuuden lisääminen nostaa maabetonin lujuutta lähes lineaarisesti. Karkearakeisissa maissa kasvu on nopeampaa. Kimmoduli kasvaa lähes suoraviivaisesti puristuslujuuden kasvaessa (kuva 20).



Kuva 20: Silttisen hiekan kimmomoduli puristuslujuuden funktiona (Kezdi 1973).

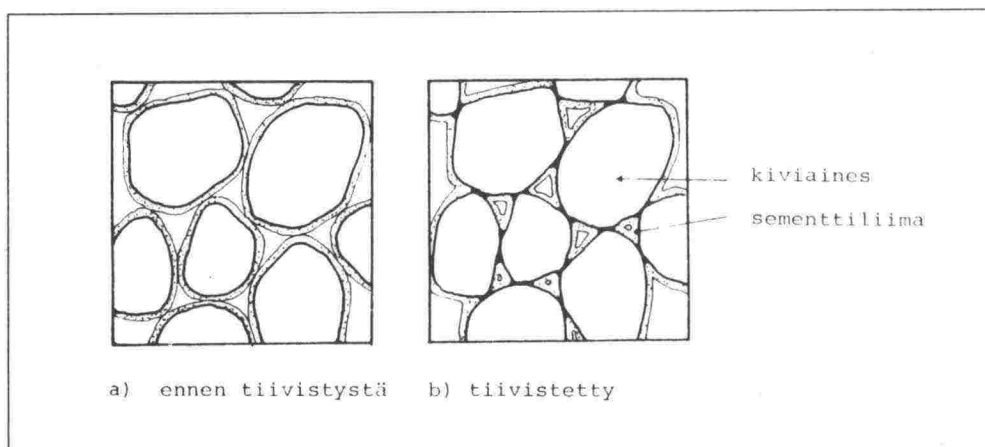
Maabetonin poissoninluku vaihtelee 0,23 - 0,31. Mitä enemmän on hienoaainesta, sitä suurempi on poissoninluku. Maalajin plastisuus pienenee stabiloitaessa. Sementtipitoisuuden kasvaessa suurenee kerroksen vetolujuus ja halkeamia syntyy harvempaan, mutta ne ovat suurempia. Rakenteellisesti useita pieniä halkeamia on parempi kuin yksi iso halkeama (Lindgren 1980).

Vedenläpäisevyys pienenee sementtipitoisuuden kasvaessa. Jos vedellä kyllästetyssä maabetonissa vedenläpäisevyys on suuri, pump-paa liikennekuormituksen vaihtelu vettä edestakaisin. Veden liike rapauttaa maabetonia sitä enemmän, mitä pienempi sen lujuus on (Lindgren 1980).

Maabetonin roudankestävyys riippuu oleellisesti sementtipitoisuudesta. Moreenin routanousukokeissa on todettu stabiloidun silttimoreenin (hietamoreenin) kestävän rikkoutumatta 9 %:n sementtimäärällä ja sora- ja hiekkamoreenin 5 %:n sementtipitoisuudella. Vastaa-vat puristuslujuudet olivat silttimoreenilla (hietamoreeni) 2,9 MN/m<sup>2</sup>, hiekkamoreenilla 2,5 MN/m<sup>2</sup> ja soramoreenilla 3,4 MN/m<sup>2</sup>. Pakkaskokeen perusteella moreenit kestävät roudan rapauttavaa vaikutusta hyvin jo 5 %:n sementtipitoisuudella. Painohäviöt ovat olleet tällöin 1,5 - 7 %. AASHO:n ohjeiden mukaan sallitaan stabiloinnille korkeintaan 10 %:n painohäviö. Puristuslujuudet ovat olleet vastaa-vasti 1,7 - 2,5 MN/m<sup>2</sup> (Lindgren 1980).

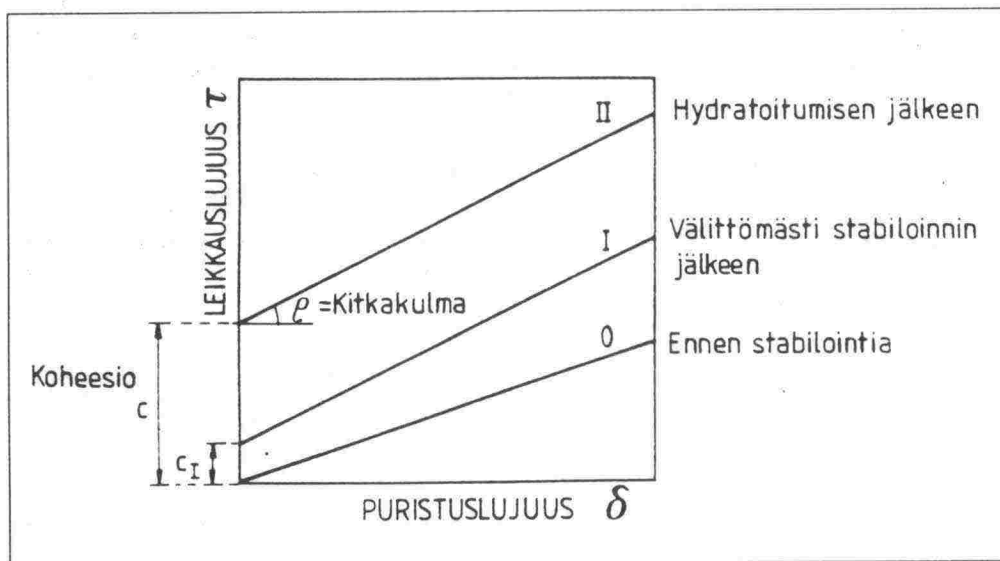


- 3) Tiivistettäessä rakeet painuvat toisiaan vasten (kuva 21), jolloin kosketuskohtiin rakeiden väliin jää ohut sementtiliimakerros, joka kovettuessaan sitoo rakeet toisiinsa. Mitä tehokkaampi tiivistys on, sitä suurempi on rakeiden välisten tartuntakohtien pinta-ala.



Kuva 21: Tiivistyksen vaikutus rakeitten väliseen tartuntaan (Lindgren 1980).

Tiivistäminen ja rakeisuuden paraneminen saa aikaan kitkakulman ja koheesion kasvamisen (kuva 22, suora I). Sementin sitoutuminen nostaa edelleen koheesiota (suora II) (Lindgren 1980).

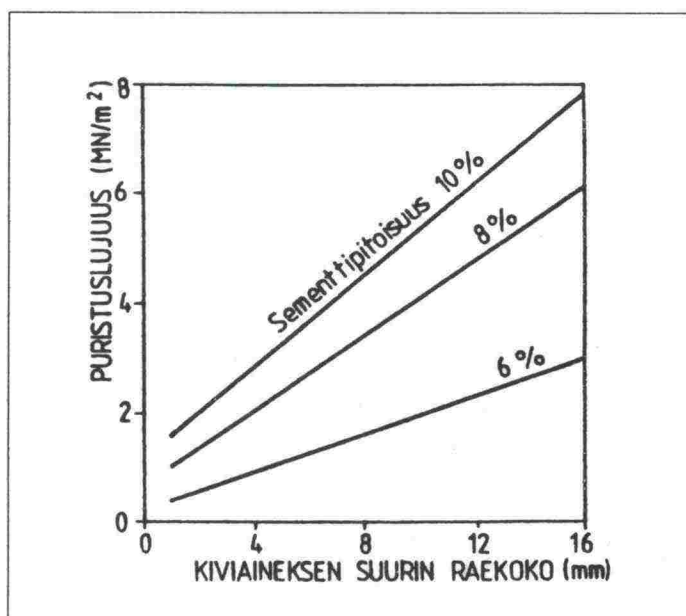


Kuva 22: Maan leikkauslujuuden kasvu sementtistabiloinnissa (Schubenz 1977).

Maabetonin lujuuteen vaikuttaa varsin ratkaisevasti massan tiivistysaste. Tiivistymisen viivästyminen (esim. 3 - 5 h) aiheuttaa sen, ettei hyvää tiivistysastetta enää voida saavuttaa, ja näin massan puristuslujuus voi jäädä jopa alle puoleen suunnitellusta lujuudesta.

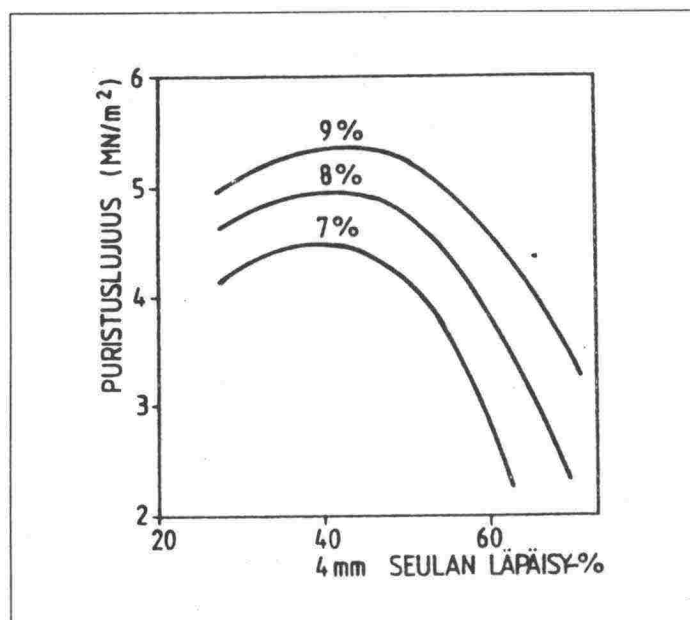
- 4) Suuri savimäärä vaikeuttaa veden ja sementin sekoittamista maahan. Hienoaineksella on huomattavasti suurempi ominaispinta-ala (esim.  $60000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) kuin sementillä ( $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ), joten karkeampi sideaine ei pysty peittämään kiviainesta eikä sitomaan rakeita toisiinsa (Lindgren 1980). Tästä syystä lujuuden lisäys jää hyvin pieneksi. Edellä olevan perusteella voitaisiin kokeilla erittäin hienoksi jauhetun sementin lisäämistä "lisäaineeksi" sementin joukkoon

Maabetonin puristuslujuus kasvaa kiviaineksen maksimiraekoon kasvaessa (kuva 23) (Lindgren 1980).



Kuva 23: Suurimman raekoon vaikutus puristuslujuuteen (Hyypä, J.).

Suurimmat puristuslujuudet saadaan, kun maalajin rakeisuuskäyrä on lähellä tiiveimmän pakkauksen käyrää. Tällöin materiaalin tulee olla rakeisuudeltaan sellaista, että saavutetaan suurin irtotiheys tiivistetyssä seoksessa. Kun esimerkiksi hiekkalajitteen määrä kasvaa tästä yli, pienenee puristuslujuus (kuva 24). Jos materiaali on lajittunutta tai siitä puuttuu jokin lajite, ei päästä samalla sementtipitoisuudella samoihin lujuuksiin kuin suhteistuneella maalla (esim. hienoainesta liian vähän tai paljon) (Lindgren).



Kuva 24: 4 mm:n seulan läpäisseen aineksen määrän vaikutus puristuslujuuteen (Hyypä, J.).

Alkio selvitti tutkimuksessaan hienoaineksen vaikutusta stabiloidun moreenimurskeen pakkakestävyyteen. Kokeissa käytettiin moreenimurskeita, joiden hienoainespitoisuudet (0,074 mm:n läpäisyprosentti) olivat 16, 27 ja 35 %. Rakeisuuskäyrien muoto oli tiiveimmän pakkauksen mukainen maksimiraekoon ollessa 16 mm.

Tutkimuksessa tavoitelujuuden 6 MN/m<sup>2</sup> saavuttamiseksi tarvittiin sementtipitoisuudet 2,5, 3,5 ja 5,5 % hienoainemäärän kasvaessa.

Karkea hienoainespitoisuus vaikeutti massan sekoittumista tasaiseksi sekä lisäsi sekoitusaikaa ja tulosten hajontaa.

Koekappaleiden rapautumiskestävyys oli riittävä hienoainespitoisuudesta riippumatta, jos 7 vrk:n puristuslujuus oli vähintään 4 MN/m<sup>2</sup>.

Jäädätyssulatuskokeessa puristuslujuus (91 vrk) pieneni enemmän suurilla hienoainespitoisuuksilla. Tämä viittaa siihen, että hienoainespitoiset sementtistabiloinnit menettävät lujuuttaan nopeammin kuin vähän hienoainesta sisältävät sementtistabiloinnit.

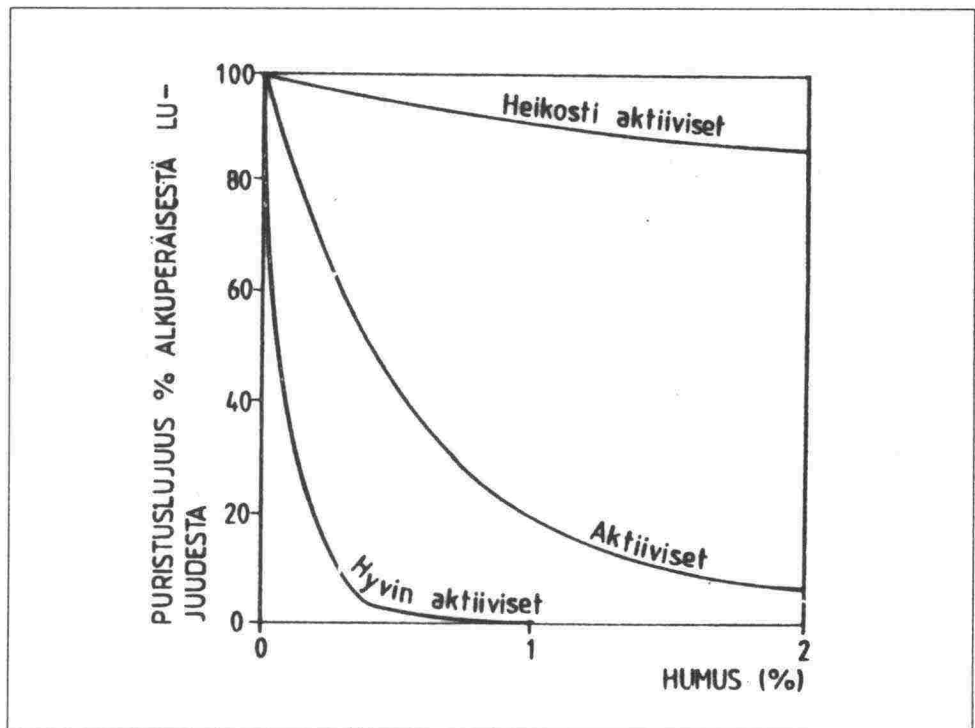
Ko. tutkimuksessa tavoitelujuudet saavutettiin huomattavasti sementtistabilointiohjeen nomogrammin antamia pienemmillä sementtipitoisuuksilla. Havainto korostaa ennakkokokeiden tekemisen merkitystä moreenien stabiloinneissa.

Ruotsin tielaitoksen ja VTI:n tekemässä soratien pintakerroksen stabilointitutkimuksessa voitiin havaita, että kiviaineksen rakeisuuden tasalaatuisuudella on suuri merkitys stabiloinnin onnistumiselle. Rakeisuudeltaan liian vaihtelevissa teissä saavutettu kantavuuden lisäys oli lyhytaikaista (Bergstrand et al 1985). Sorakerroksen kulutusker-



roksena olevan materiaalin raejakautuma muistuttaa hyvin suhteistunutta karkeaa moreenia. Näin ollen voidaan päätellä, että massan homogeenisuudella on vastaavanlainen vaikutus stabiloidun moreenikerroksen lujuuteen kuin soralla.

- 5) Humus on orgaanisten ainesten, lähinnä kasvien, mätänemistuote, joka muuttuu jatkuvasti mm. hapen, bakteerien ja sienien vaikutuksesta. Humuksessa olevat hydroksyyli-ryhmät reagoivat sementin kalsiumionien kanssa, seoksen pH-arvo pienenee ja sementtipartikkelien päälle muodostuu kalvo. Lujittuminen vähenee tai jopa estyy. Se miten voimakkaasti humus vaikuttaa sementin hydratoitumiseen, riippuu humuksen aktiivisuudesta. Kuvassa 25 on esitetty humuksen aktiivisuuden vaikutus puristuslujuuteen. Humuksen vaikutusta voidaan estää sekoittamalla maahan ylimääräisiä kalsiumioneja. Yksinkertaisin tapa lienee lisätä sementtipitoisuutta 1 - 2 prosenttiyksikköä. Kalsiumionien määrää maassa voidaan lisätä myös kalkin tai kalsiumkloridin muodossa. Kalkin ja kalsiumkloridin sekoitusmäärinä käytetään 1 - 2 % kiviaineksen kuivapainosta. Lisäaineiden käyttö on kuitenkin tarkistettava ennakkokokein, sillä kalkin lisäys ei aina vaikuta tarkoitetulla tavalla, vaan se voi jopa heikentää puristuslujuutta.



Kuva 25: Humuksen vaikutus maabetonin puristuslujuuteen (Hyypä, J.).

Kalkin ja humuksen reagointi kestää yhdestä kahteen viikkoon, joten kalkki on sekoitettava maahan hyvissä ajoin ennen varsinaista stabiointia. Reaktioaika pitenee lämpötilan laskiessa alle +10°C asteeseen ja reagointi loppuu lähes kokonaan lämpötilan laskiessa alle +5°C.

Alkio totesi tutkimuksessaan, että tavoitelujuuden vaatima sideainepitoisuus riitti eliminoimaan moreenimurskeen humuksen vaikutukset (humusaste II - III).

- 6) Jos moreeni sisältää runsaasti hienoaainesta, voidaan hienoaines yrittää saada kasautumaan käyttämällä erilaisia lisäaineita, joilla maassa olevat alkali-ionit vaihdetaan Ca-ioneiksi. Kookkaammat Ca-ionit sitovat vähemmän vettä, jolloin hiukkasia ympäröivä vaippavesikerros pienenee ja hiukkaset voivat siirtyä lähemmäksi toisiaan. Lisäaineen avulla voidaan säädellä myös jo lujitetun kerroksen vesipitoisuutta. Pinta-aktiivinen lisäaine alentaa veden pintajännitystä, jolloin veden kapillaarinen nousu pienenee. Pectaore-sementissä olevan lisäaineen vaikutuksesta väheni veden imeytyminen veden alla oleviin koekappaleisiin. Imeytyvä vesimäärä eri Pectaore-sementtipitoisuuksilla oli 0,8 - 1,1 % kappaleiden painosta. Vastaavilla yleisportland-sementtipitoisuuksilla oli imeytyvä vesimäärä 4,8 - 13,8 %.

Muun muassa seuraavia sementin ominaisuuksia muuttavia lisäaineita voidaan käyttää:

- Natriumyhdisteet (natriumsulfaatti, natriumkarbonaatti, sulfaatti, metaanikloriitti, aluminaatti)
- Kalsiumkloriitti (nopeuttaa reaktiota).

Oikein valituilla lisäaineilla ja lisäainemäärillä voidaan maabetonin puristuslujuutta nostaa. Lisäainetarve on noin 0,2 - 2,0 % sideainemäärästä. Käytettäessä lisäaineita tulee lisäaineen vaikutus aina testata ennakkokokeilla. Lievän yliannostuksen vaikutus on myös tarkistettava, sillä jossain tapauksissa lisäaineen yliannostus voi estää kokonaan lujuuskehityksen. Jos lisäaineen yliannostus estää huomattavasti lujuuskehitystä, on tarkoin harkittava, voidaanko lisäainetta käyttää.

Eri tutkimuksissa (Meriläinen 1986 ja Moreenimurskeen stabilointikoe 1983) on saatu mm. seuraavia kokemuksia lisäaineista:

- Glorit-lisäaineella ei ole vaikutusta humuksen neutraloinnissa
- lisäaineet Rauma-ultra, Parmix ja Melment L 10 eivät vaikuta kuonasementtiseosten alkulujuuteen, mutta loppulujuudet paranevat
- masuunikuona-sementti-moreenimurskeseoksilla natriumhydroksidi ei parantanut lujuuskehitystä
- masuunikuona-sementti-moreenimurskeseoksilla sammutetulla kalkilla voidaan alkulujittumista jonkin verran nopeuttaa, mutta samalla loppulujuus pienenee.

Koska sementti on aika kallista, on sitä pyritty korvaamaan osittain erilaisilla sementtiä korvaavilla lisäaineilla kuten lentotuhka, tuhka-kalkki, masuunikuona ja jätekipsi.

Moreenin stabilointiin on masuunikuona osoittautunut käyttökelpoiseksi. Masuunikuonajauhe on 45 % halvempaa kuin portlandsementti. Eri sideainepitoisuuksilla stabilointityön kokonaiskustannussäästö on 5 - 15 % käytettäessä masuunikuonajauhetta osasideaineena. Moreeneissa olevan humuksen vuoksi masuunikuonajauhetta suositellaan käytettäväksi vähemmän kuin humuksettomilla kiviaineksilla. Sopiva sementti/kuonasuhde lieenee 80/20 - 60/40. Sementtistabilointiohje (1992) määrää, että maabetonitöissä masuunikuonajauheen määrä saa olla korkeintaan 50 % sideaineen määrästä. Masuunikuonajauhetta käytettäessä lujittuminen on hitaampaa (noin 2 - 4 viikkoa) kuin pelkästään sementillä stabiloitaessa. Tämän vuoksi runsaskuonaisia stabilointeja ei tule tehdä stabilointikauden lopussa syksyllä.

Hitaan alkulujittumisen takia on tarvittava sideainepitoisuus parempi määrittää 91 vrk:n ikäisten koekappaleiden puristuslujuudesta kuin 7 vrk:n ikäisistä (Moreenimurskeen stabilointikoe). Masuunikuonan alkulujittumista voidaan nopeuttaa lisäämällä jauhatusastetta kuonajauheelle tai lisäämällä sideainetta (sementtiä). Stabiloitaessa humuksisia materiaaleja on ilmeistä, että humus vaikuttaa kuonan sitoutumiseen voimakkaammin kuin sementin sitoutumiseen. Hitaasta alkulujittumisesta huolimatta saavuttaa sementti/kuonaseos suuremman loppulujuuden kuin puhdas sementti (Meriläinen 1986).

Tutkimustietoa tuhkan käytöstä sementtistabiloinnissa ei ollut käytettävissä kirjallisuusselvitystä tehtäessä. Kuitenkin voitane sanoa, että tuhkan käyttöön sementtiä korvaavana lisäaineena on suhtauduttava erittäin suurella varovaisuudella. Sellaisissa tapauksissa, joissa tuhka ei sitoudu/hydratoidu, huonontaa tuhkan käyttö moreenin ominaisuuksia lisäämällä hienoaineksen määrää.

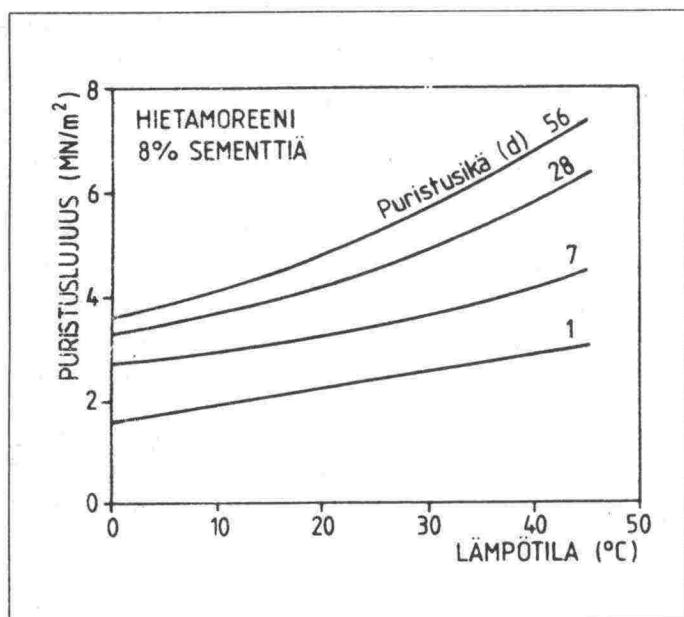
Verrattaessa portland- ja yleissementin soveltuvuutta moreenin stabilointiin, on havaittu portlandsementillä saatavan humuksisessa maassa hiukan parempia lujuuksia kuin yleissementillä. Tämä johtunee siitä, että portlandsementti sisältää enemmän humusta neutraloivia  $\text{Ca}^+$ -ioneja kuin yleissementti (Nousiainen 1989).

Masuunikuonajauheen kanssa on käytettävä portlandsementtiä (Sementtistabilointiohje 1992).

Eri seosainesuhteista johtuen eroavat yleissementin ja portlandsementin vedensitomiskyky. Portlandsementti kuluttaa enemmän vettä hydratoitumisessa kuin yleissementti (Nousiainen 1989).

- 7) Mitä korkeampi lämpötila hydratoitumisen aikana on, sitä nopeammin tietty lujuus saavutetaan (kuva 26). Tämä puoltaa stabiloinnin suorittamista lämpimimpänä vuodenaikana. Kovettumisajan lisääntyessä kasvaa puristuslujuus.





Kuva 26: Lämpötilan vaikutus puristuslujuuteen (Hyypä, J.).

Sementtisorateille annetuissa ohjeissa (ruotsalainen käsikirja, joka on käännetty suomeksi, Bergstrand et al 1985)  $+20^{\circ}\text{C}$  lämmössä saadun lujuuden saavuttamiseen tarvitaan  $+10^{\circ}\text{C}$  lämpötilassa 2-kertainen aika ja  $+5^{\circ}\text{C}$  lämpötilassa 3-kertainen aika. Sementillä sidottua sorakerosta ei tule rakentaa, jos lämpötila voi alittaa  $+5^{\circ}\text{C}$  lähipäivinä. Sementillä sidotun sorakerroksen ei saa antaa jäätyä ensimmäisten 7 päivän aikana. Jos pakkasen kuitenkin pääsee yllättämään, tulee sidottu sorakerros peittää lämmöneristävällä materiaalilla. Yllä esitettyä ohjetta voitaneen soveltaen käyttää myös moreenistabiloinnissa.

### 3.2.2 Stabiloinnin suunnittelu ja kerrospaksuuden mitoitus

#### 1) Suunnittelu ja mitoitusprosessi

Stabilointityön suunnittelu voidaan toteuttaa seuraavalla tavalla:

- tutkitaan stabilointia eräänä rakennevaihtoehtona tien rakentamisessa/kunnostuksessa
  - \* voidaanko stabilointityö yleensäkin tehdä?
  - \* onko taloudellisesti kannattava?
- mitoitetaan stabiloitava kerros ottamalla huomioon
  - \* tavoitekantavuus
  - \* roudankestävyys
  - \* halkeilu
- valitaan stabilointityömenetelmä
  - \* paikallasekoitus/asemasekoitus.

Stabilointia suunniteltaessa rakennuspaikalta ja sen ympäristöstä saatava kiviaines kartoitetaan. Kiviaineksen soveltuvuus stabilointiin määritetään raekokeiden ja humuskokeiden perusteella. Lisäksi jo tässä vaiheessa on syytä tehdä alustavia puristuslujuuskokeita. Stabiloinnissa tarvittavan veden saatavuus voidaan selvittää kiviaineksen kartoituksen yhteydessä. Selvitettäessä taloudelliselta näkökannalta, kannattaako stabilointi vai ei, tulee kustannusvertailu suorittaa kokonaistaloudellisesti ottaen huomioon sekä rakennuskustannukset että käyttökustannukset. Vertailussa tulisi huomioida myös sellaiset vaihtoehdot, joissa pienellä lisäkustannuksella saadaan huomattavasti toimivampi ja kestävämpi rakenne.

Maabetonikerrosta suunniteltaessa valitaan kerroksen tavoitekantavuus, jonka perusteella määritetään tarvittava sementtimäärä ja kerrospaksuus. Sementtimäärää ja kerrospaksuutta määritettäessä otetaan huomioon vaadittu vähimmäislujuus roudan rapauttavaa vaikutusta vastaan sekä halkeilu. Maabetonikerroksen liittyminen muuhun tierakenteeseen suunnitellaan sellaiseksi, että ko. kerroksessa tapahtuvat liikkeet, halkeilu ym. vaikuttavat mahdollisimman vähän muuhun tierakenteeseen.

Itse stabilointityötavan valinta, paikallasekoitus vai asemasekoitus, suoritetaan paikallisten olosuhteiden ja stabiloidulta kerrokselta vaadittujen ominaisuuksien mukaan. Paikallasekoitusmenetelmää voidaan uuden sementtistabilointiohjeen (1992) mukaan käyttää tehtäessä jakava tai kantava kerros maabetonista. Asemasekoitusmenetelmällä maabetonia tehtäessä kohteena on yleensä kantava kerros.

Asemasekoitetun, 3,5 - 4,5 %:n sementtipitoisuudella valmistetun maabetonikerroksen ja asfalttikerroksen väliin ei yleensä tarvitse rakentaa sitomatonta murskekerrosta. Sen sijaan paikalla sekoitettu, suuremman sementtipitoisuuden vaativa maabetonirakenne kannattaa tehdä "sandwich"-rakenteeksi, jossa asfaltin ja maabetonin välissä oleva sitomaton kerros estää kutistumishalkeamien ulottumisen päällysteeseen. Sementtistabilointiohjeen (1992) mukaan sitomatonta murskekerrosta voidaan käyttää alemman luokan teillä päällysrakenteissa 4 - 6. Ohjeen mukaan kerroksen minimipaksuus on 10 cm ja maksimiraekoko on 40 mm. Kyseisen menettelyn riskinä on murskekerroksen kiviaineksen hienontuminen päällysteen ja lujan maabetonin välissä. Päätettäessä sitomattoman kerroksen käytöstä on tehtävä valinta päällysteeseen mahdollisesti syntyvien heijastehalkeamien tai hienonemisesta aiheutuvien muodonmuutosten ja vaurioiden välillä.

## 2) Kohteessa tehtävät tutkimukset

### Näytteenotto

Näytteiden otolla pyritään ryhmittelemään maalajit vesipitoisuuden, rakeisuuden ja humuspitoisuuden mukaan omiksi alueikseen. Näytteitä ei kannata ottaa kaavamaisesti esim. 100 m välein, vaan tulee pyrkiä löytämään ominaisuuksien muutoskohdat ja välttää turhia näytteitä. Maatutkaluotaus on usein erittäin sopiva menettely haettaessa kerrosten ja materiaalien muutoskohtia, joten sen avulla tarkemmat tutkimukset pystytään kohdistamaan kaavamaisesta menettelyä paremmin.



Kunkin ominaisuuksiltaan erilaisen osa-alueen näytemäärän tulee olla 30 - 40 kg ja tästä on ainakin osa säilytettävä tiiviissä astiassa vesipitoisuuden selvittämiseksi. Sementtistabilointiohje (1992) määrää yksittäisen kiviainesnäytteen määräksi 100 kg.

Kivisyys tutkitaan yleensä jo näytteenoton yhteydessä kaivamalla noin yhden neliömetrin suuruinen 30 - 40 cm syvä kuoppa ja seulomalla näyte 64 mm seulalla. Kivisyys ilmoitetaan painoprosentteina. Punnitusten asemasta voidaan painot arvioida mitta-astialla (Lindgren).

#### Kantavuusmittaukset

Pohjamaan tai parannettavan rakenteen kantavuus voidaan mitata pudotuspainolaitteella tai levykuormituskokeella, ja vanhan rakenteen kantavuus myös Benkelman-palkilla. Mittaukset suoritetaan 50 - 100 m välein vuoroin molemmilta kaistoilta. Tavoitteena on selvittää roudan sulamisai- kainen kantavuus eli kun routa on sulanut noin 0,5 m syvyyteen.

Pudotuspainolaitemittauksella saatavan taipumasuppilon avulla saadaan parannettavasta rakenteesta tietoa, jonka avulla kantavuuden parantamisen tarve voidaan määrittää valmiita laskentaohjelmia käyttäen.

### 3) Materiaalitutkimukset

#### Rakeisuus

Rakeisuus voidaan määrittää **kuivaseulonnalla** vain silloin, kun kiviainek- sessa ei ole oleellisesti hienoainesta. Yleensä näyte on tutkittava **pesu- seu- lonnalla** ja jos hienoainesta ( $< 0,074$  mm) on yli 10 %, on sen rakeisuus syytä selvittää **areometrikokeella** (Lindgren 1980). Moreenien hienoaines voi vaihdella laadultaan huomattavasti. Hienoaineksen luokitteluun ei ole yksiselitteistä määritystapaa, mutta esimerkiksi ominaispinta-ala voi antaa viitteitä moreenin käyttäytymisestä. Varmin tapa selvittää moreenin kel- poisuus stabilointiin on tehdä riittävä määrä ennakkokokeita.

#### Humuspitoisuus

Humuspitoisuus määritetään **natriumhydroksidikokeella**. Yleensä kiviain- nes, jonka humusluokka on 0 - II, sopii stabiloitavaksi ilman humuksen neutralointia. Jos humusluokka on III tai IV, on puristuslujuuskokeiden avulla selvitettävä, onko taloudellisinta käyttää pelkkää sementtiä vai pyr- kiä neutraloimaan humuksen vaikutusta lisäaineilla tai varsinkin IV hu- musluokan maalla käyttää uutta puhtaampaa kiviainesta (Lindgren 1980).

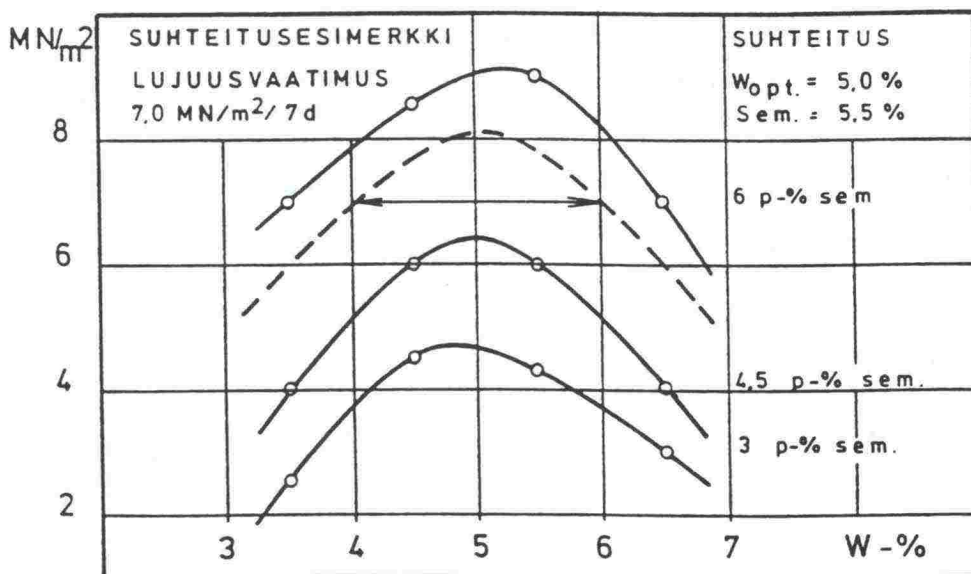
Nykyisin käytettävät humuspitoisuuden määritysmenetelmät eivät kerro yksiselitteisesti muuta kuin sisältääkö kiviaines humusta vai ei. Kokeilla ei saada selville humuksen haitallisuutta sementin lujittumiselle. Humuksen haitallisuutta voidaan arvioida puristuslujuuskokeella.

#### Optimivesipitoisuuden ja maksimi-irtotiheyden määrittäminen

Maalajin maksimi-irtotiheys ja optimivesipitoisuus määritetään parannet- tua Proctor-menetelmää käyttäen. Soramoreenin optimivesipitoisuus ( $w_{opt}$ ) on yleensä välillä 5 - 8 %, hiekkamoreenin 5 - 10 % ja silttimoreenin 8-12 %.



Mikäli stabiloinnin tavoitteena on mahdollisimman lujan stabilointikerroksen (maabetonin) aikaansaaminen, voidaan optimivesipitoisuuden vaikutus stabiloitavan materiaalin puristuslujuuteen selvittää sementtistabilointiohjeen (1992) esittämällä tavalla (kuva 27).



Kuva 27: Puristuslujuus/W<sub>opt</sub> SEM-% (Sementtistabilointiohje 1992)

Stabiloitava maa pyritään kastelemaan niin, että tiivistyksen alkaessa seos on optimivesipitoisuudessaan. Mikäli käytetään sekoituskoneen mahdollista vedensyöttöä, tulee sekoitettavan materiaalin kosteuspitoisuus määrittää mittauksin (esim. Troxler). Lisättävä vesimäärä määritetään optimivesipitoisuuden ja materiaalin vesipitoisuuden eron pohjalta.

Stabiloinnin tiivistämistyölle annetaan tiiviysastevaatus, joka tarkoittaa tiivistetyn stabiloidun kiviaineksen kuivairtitiheyden suhdetta Proctor-tiiviyteen eli Proctor-kokeen antamaan kuivairtitiheyden maksimiin. Jakavan ja kantavan kerroksen maabetonin tiiviyden keskiarvon pitää olla 97 % parannetusta Proctor-tiiviydestä. Yksittäisen arvon pitää olla vähintään 92 % (Sementtistabilointiohje 1992).

#### 4) Stabiloitavan massan suunnittelu

Maabetonikerroksen puristuslujuuden tulee olla sopiva, ettei jouduta rakentamaan liian paksua eikä myöskään liian ohutta kerrosta tavoitekantavuutta silmälläpitäen. Liian ohuessa kerroksessa halkeamien syntyminen on suurta ja liian paksu kerros on taas kallis. Kerroksen puristuslujuuden tulee olla riittävä roudan rapauttavaa vaikutusta vastaan. Puristuslujuus voidaan määrittää puristuslujuuskokein ja roudankestävyys pakkaskokein sekä muu rapautumiskestävyys märkä-kuivakokein.

#### Puristuslujuus

Stabiloitavasta kiviaineksesta tehdään kaksi rinnakkaista koekappaletta arvioidulla sementtipitoisuudella sekä  $\pm 1$  prosenttiyksikköä eli ainakin 6

koekappaletta. Koekappaleet puristetaan 7 vuorokauden ikäisinä ja puristuslujuuksien perusteella määritetään tarvittava sementtimäärä.

### Pakkaskoe

Koekappaleet tehdään kuten puristuslujuuskokeessa. Koekappale jäädytetään ja sulatetaan, jonka jälkeen se harjataan teräsharjalla. Harjauksen jälkeen todetaan massan vähennys likimääräisesti ja toistetaan jäädytys-sulatusharjaus 12 kertaa.

Massan vähennys määritetään tämän jälkeen kuivaamalla koekappale +105 °C lämpötilassa. Sementin sitoutumiseen kuluu myös vettä, mikä on otettava huomioon massahäviötä laskettaessa. Sitoutunut vesimäärä on soralla ja hiekalla noin 1,5 % ja sora- ja hiekkamoreenilla noin 2,5 % kiviaineksen kuivapainosta (Hyypä, J.). Pakkaskokeen massahäviöt 12 kierroksen jälkeen saavat olla AASHO:n ohjeiden mukaan korkeintaan taulukon 5 mukaiset.

*Taulukko 5: AASHO:n massahäviörajat märkä-kuivakokeessa ja pakkaskokeessa (Hyypä, J.).*

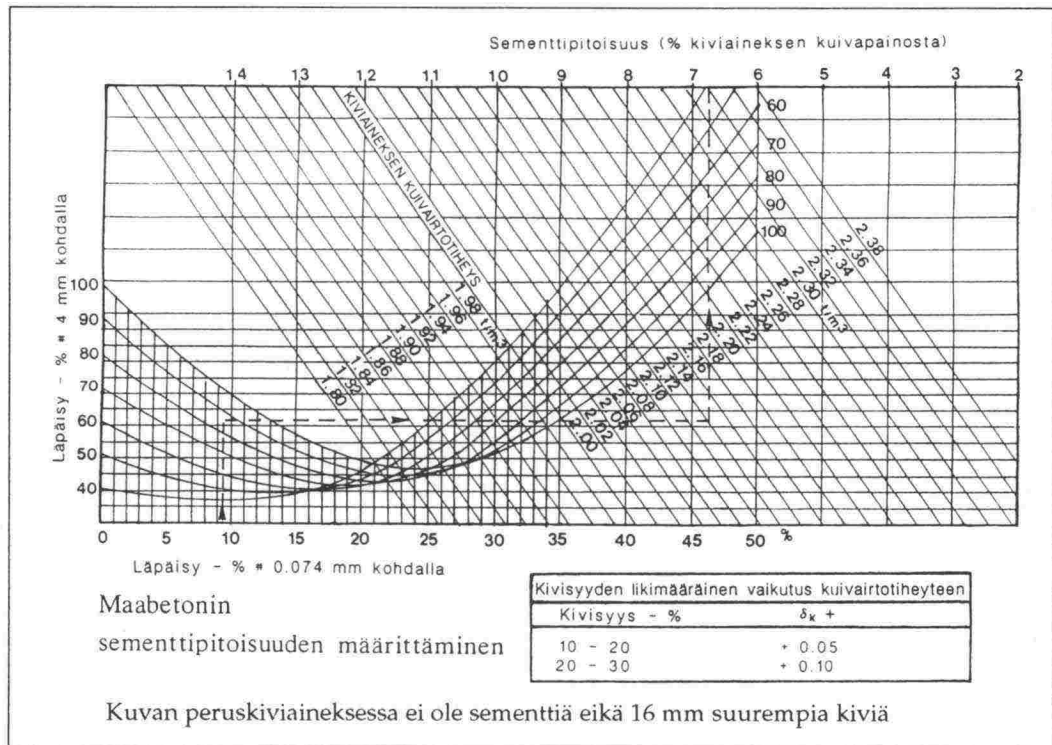
AASHO:n maalajiluokitus	Suomalainen luokitus	Massahäviö %
A-1, A-3 A-2-4, A-2-5	Kitkamaat	14
A-2-6, A-2-7 A-4, A-5	Hiekka- ja silttimoreeni Siltti	10
A-6, A-7	Savet	7

Kokeessa voidaan harjauksen asemesta mitata koekappaleiden pituuden muutos jäädytys-sulatusvaiheen aikana. Pituuden muutokset voidaan todeta venymäliuskamittauksilla tai kokeen alussa ja lopussa mittakellolla. Pysyvä laajeneminen ensimmäisen ja viimeisen jäädytyksen välillä ei saisi olla suurempi kuin 0,1 % (Hyypä, J.). Menetelmän etuna on koekappaleiden säilyminen puristuskelpoisina.

### Märkä-kuivakoe

Koekappaleet tehdään kuten pakkaskokeessa. Upotus-kuivaus-harjaus-käsittely toistetaan 12 kertaa. Lopuksi koekappaleet kuivataan +105 °C, määritetään massahäviö sekä korjataan tulosta sementin sitoutumiseen kuluvan veden osalta kuten pakkaskokeessa. Sallitut massahäviöt ovat samat kuin pakkaskokeessa (taulukko 5).

**Sementtipitoisuutta määritettäessä** pitäisi tehdä vähintään puristuslujuuskoe. Koetta varten voidaan alustava sementtipitoisuus arvioida diagrammista (kuva 28). Sementtistabilointiohje (1992) edellyttää asemasekoituksessa vähintään 3,5 painoprosentin ja tiesekoituksessa vähintään 4,5 painoprosentin sementtipitoisuutta kiviaineksen kuivatiheydestä laskettuna. Pelkkä puristuslujuuskoe riittää routimattomilla mailla sementtipitoisuuden määrittämiseksi. Pakkaskoe ja märkä-kuivakoe on syytä tehdä routivilla mailla erityisesti hyvin suurissa työkohteissa.



Kuva 28: Maabetonin sementtipitoisuuden määrittäminen  
(Sementtistabilointiohje 1992).

### 5) Kerrospaksuuden mitoitus

Maabetonikerroksen paksuus määräytyy alla olevan kerroksen kantavuuden, stabiloidun kerroksen E-moduulin ja tavoitekantavuuden perusteella.

Maabetonin ja laihan maabetonin E-moduuli voidaan määrittää taulukon 6 perusteella. Maabetonin E-moduuli voidaan arvioida myös puristuslujuuden perusteella seuraavalla likimääräiskaavalla (Sementtistabilointiohje 1992):

$$E_{MB} \approx 1000 * \sigma_p [MN/m^2(7d)] \quad (1)$$

missä  $E_{MB}$  on maabetonin kimmomoduuli  
 $\sigma_p$  puristuslujuus 7 vuorokauden ikäisenä.

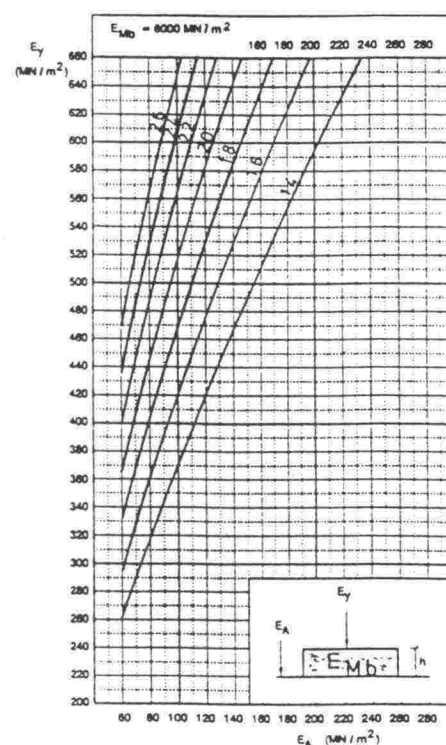
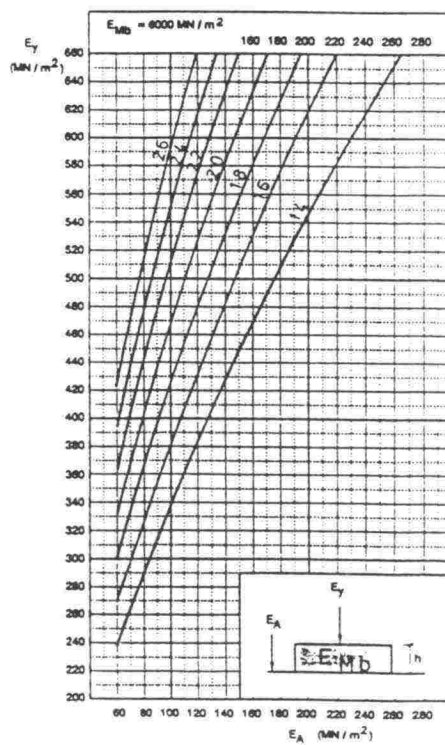
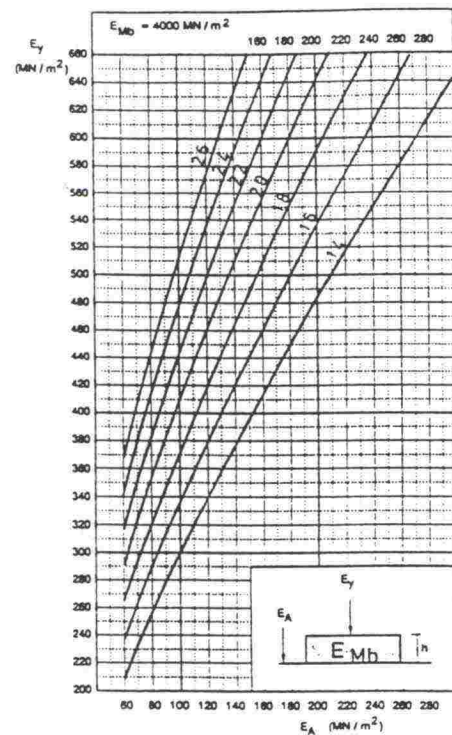
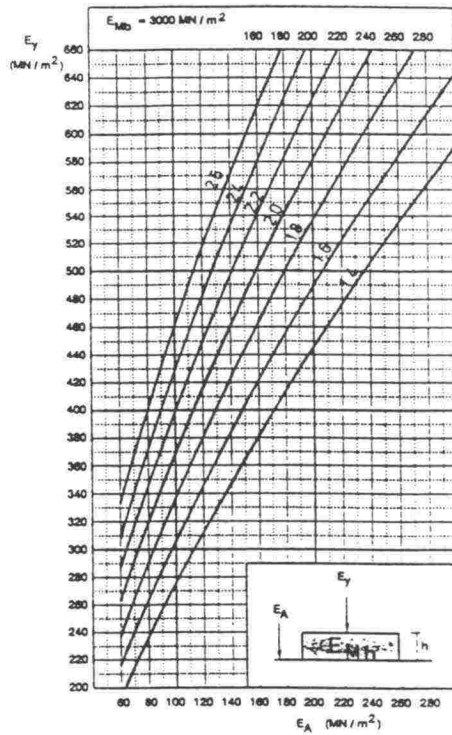


Taulukko 6: Maabetonin ja laihan maabetonin E-moduulin määrittäminen  
(Sementtistabilointiohje 1992).

Stabilointitöiden suunnittelun reunaehdot	Tiesekoitus			Asemasekoitus		
	Alustan E-moduuli MN/m <sup>2</sup>			Alustan E-moduuli MN/m <sup>2</sup>		
	40	60	100	80	120	180
Rakennekerroksen kimmomoduli MN/m <sup>2</sup>	Puristuslujuus MN/m <sup>2</sup> 7 d ikäisenä minimi					
	Suod. 2	Jakava 3	Kantava 6	Jakava 4	Kantava 6	Jyräbet. 10
	Kerrospaksuus cm					
Tiesekoitus (Laiha Mb)				Asemasekoitus (Maabetoni)		
1500...2000	> 14	-	-	-	-	-
2000...2500	17-35	> 14	-	-	-	-
2500...3000	> 27	19-30	-	-	-	-
3000...3500	-	> 30	15-32	-	-	-
3500...4000			23-35	14-20	14-16	-
4000...			32	16-29	15-25	> 14
				24-35	20-35	14-30
					> 30	> 25

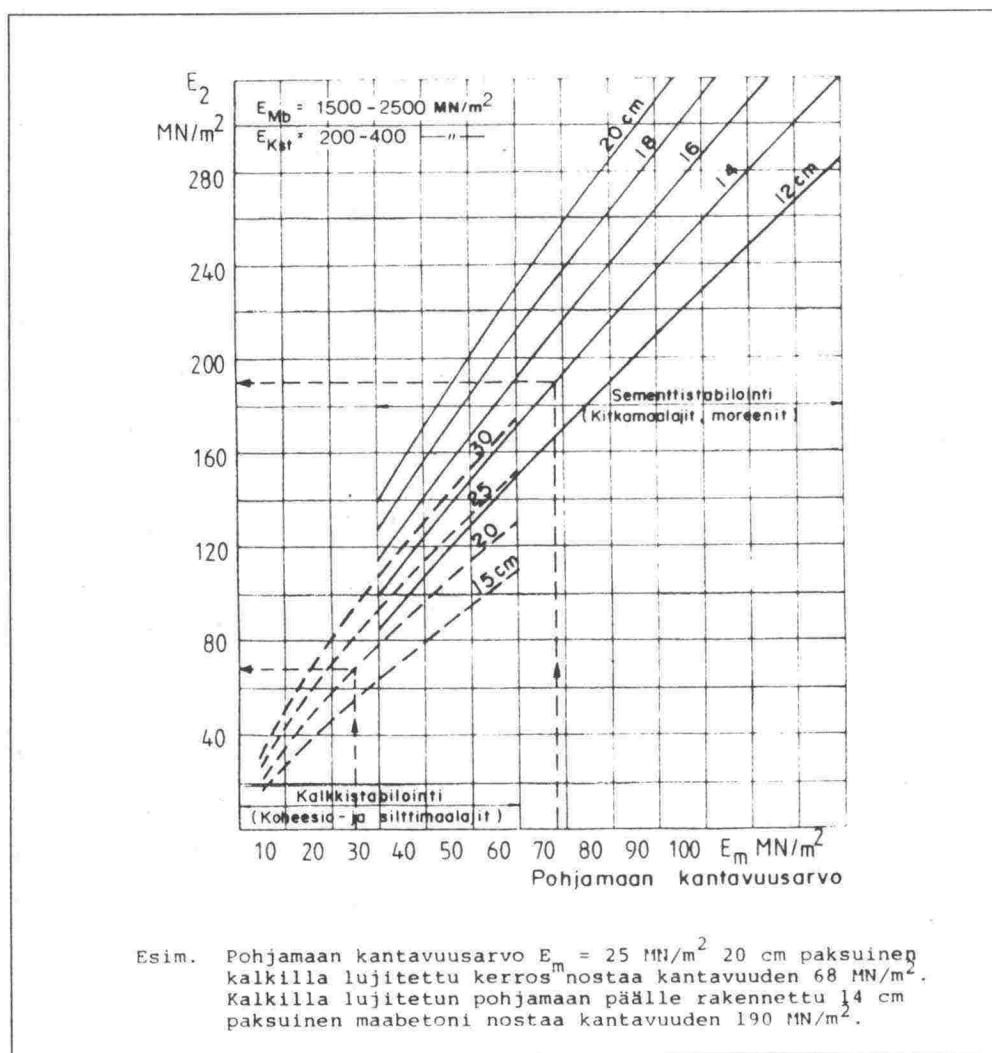
Uudessa sementtistabilointiohjeessa (1992) on esitetty kuvan 29 mukaiset kantavuusmitoituskäyrät. Ohjeessa on esitetty myös esimerkkirakenteet eri päällysrakenneluokille.

# KANTAVUUSMITOITUS MITOITUSKÄYRÄSTÖT



Kuva 29: Kantavuusmitoitus (Sementtistabilointiohje 1992).

Tehtäessä sementillä stabiloitua rakennetta voidaan käyttää kuvan 30 mukaista mitoitusdiagrammia. Siinä käytettävä stabiloidun kerroksen E-moduuli on alhaisempi kuin sementtistabilointiohjeessa käytettävät E-moduulit. Tehtäessä sementtistabilointiohjeen tarkoittamaa maabetonia on noudatettava ko. ohjetta.



Kuva 30: Stabiloidun rakenteen kerrospaksuuden määrittäminen (Lindgren 1980).

Maabetonin paksuuden tulisi yleensä olla routimattomalla maalla vähintään 14 cm. Yhdellä kerralla stabiloitavan kerroksen paksuus määräytyy sekoituskoneen tehon perusteella. Saksalaisten ohjeiden (Paulman 1975) mukaan paikallasekoituksessa tulisi käyttää vähintään 15 cm kerrospaksuutta ja asemasekoituksessa vähintään 12 cm kerrospaksuutta. Stabiloidun kerroksen paksuuden ollessa alle ohjepaksuuden sen kuormitusta jakava kyky heikkenee voimakkaasti. Toisaalta maabetonikerroksen paksuuden kasvaessa yli 40 cm ei kuormituksenjakamiskyky enää lisäänty (Näpänkangas 1973).



## 6) Heijastushalkeilun rajoittaminen

Maabetonin kuivuessa ja kovettuessa se kutistuu, jolloin stabiloituun kerrokseen syntyy vetohalkeamia. Jos stabiloitu kerros lujittuu paljon, syntyy vetohalkeamia vähemmän, mutta ne ovat suurempia. Näin ollen ei kannata pyrkiä liian suureen lujuuteen. Koska lämpötilan lisääntyessä saavutetaan nopeammin tietty lujuus, esim. lujuus halkeamien syntyhetkellä, kasvaa halkeamien koko lämpötilan lisääntyessä. Siten ei myöskään ole suotavaa tehdä stabilointia kaikkein lämpimimpänä ajankohtana. Colombier et al tekemässä raportissa todettiin, että tiestä, josta osa tehtiin kesäkuussa ja osa lokakuussa, syntyi halkeamia kesäkuun osaan, kun taas lokakuussa tehtyyn osaan ei tullut halkeamia. Maabetoniin syntyvät halkeamat aiheuttavat heijastehalkeamia betonissa kiinni oleviin sidottuihin kerroksiin. Päällysteeseen syntyvät halkeamat ovat sitä suuremmat, mitä lujemmin päällyste on kiinni maabetonikerroksessa.

Tärkeimpiä menetelmiä päällystehalkeamien vähentämiseksi ovat (Weckström 1974, Örbom, B., RILEM):

1. Stabiloidun kerroksen halkeamien vähentäminen
  - vesipitoisuuden vähentäminen (Sveitsi)
  - erikoissementti (Saksan liittotasavalta)
  - bitumin lisäys (Ranska, DDR)
2. Maabetonin halkeamien etäisyyden pienentäminen
  - liikuntasaumat (Hollanti)
  - CRAFT-menettely: bitumiemulsiolla täytetyt liikuntasaumat (Ranska)
3. Maabetonin lämpöliikkeiden vähentäminen
  - ankkurointimenetelmä (Ruotsi)
4. Päällysteen jännitysten pienentäminen
  - Sandwich-rakenne
  - päällysteen paksuuden lisäys
5. Päällysteen joustavuuden lisääminen
  - pehmeä sideaine
  - lisäaineet

Useissa kokeissa (Poijärvi 1966) on todettu päällysteen halkeilun olevan vähäisempää, kun stabiloinnissa on käytetty tiettyä kriittistä vesipitoisuutta pienempää arvoa (< 80 % tiivistetyn maabetonin tyhjätilasta veden kylästämaa). Käyttämällä stabiloinnissa erikoissementtiä, voidaan erityisesti hiekkaisella materiaalilla vähentää veden tarvetta ja näin vähentää halkeilua (Lindgren 1980).

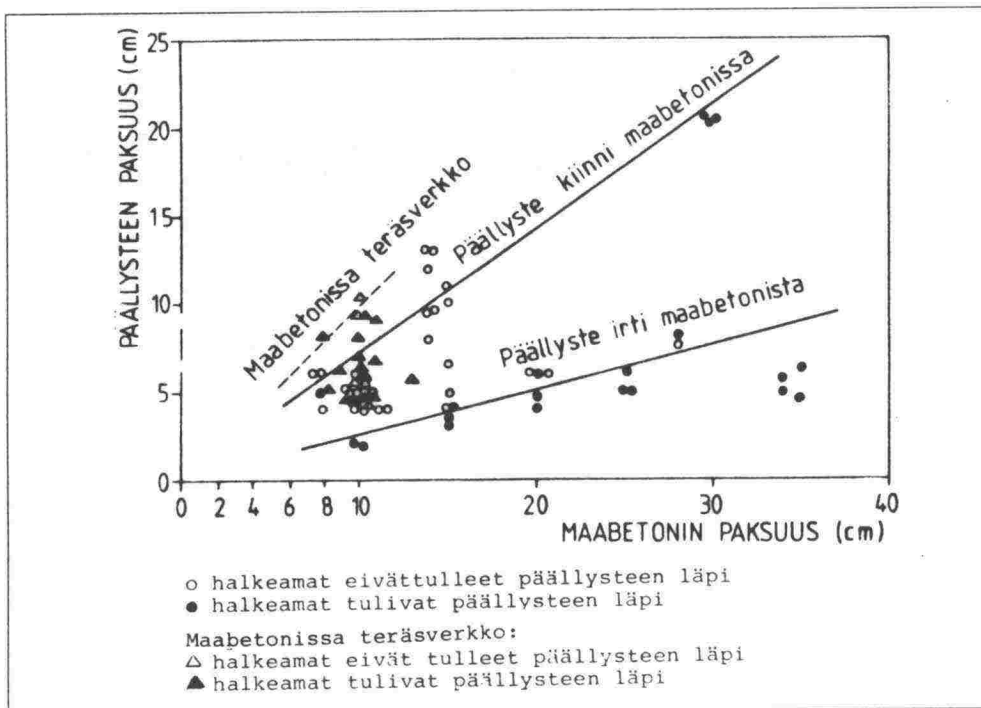
Stabiloidun kerroksen ominaisuuksia on yritetty muuttaa lisäämällä asfalttiemulsiota maabetonin sekaan. Tulokset eivät ole olleet ainakaan vielä toivottuja. Samoin liikuntasauvojen käyttö maabetonissa on osoittautunut

kannattamattomaksi (Lindgren 1980). Toisaalta ranskalaiset raportoivat lupaavia tuloksia bitumiemulsiolla täytettyjen saumojen käytöstä. Menetelmästä käytetään nimeä CRAFT (RILEM).

Kitkan lisääminen pohjamaan ja maabetonin välillä poikittaisurilla saattaa vähentää maabetonin liikettä. Tätä ankkurointimenetelmää tutkitaan erityisesti Ruotsissa. Erikoiskone tekee stabiloinnin normaalia kalliimmaksi (Lindgren 1980).

Sandwich-rakenteessa päällysteen ja maabetonin välissä oleva sitomaton rakenne toimii liukukerroksena ja estää suhteellisen hyvin päällysteen halkeilun (Lindgren 1980). Menetelmän riskinä on sitomattoman kerroksen jauhautuminen maabetonin ja päällysteen välissä.

Päällysteen paksuuden lisäys on toimiva mutta kallis ratkaisu. Tästä syystä on pyritty selvittämään se kriittinen päällystepaksuus, joka juuri ja juuri kestää jännitykset ilman sanottavaa halkeilua (kuva 31) (Lindgren 1980).



Kuva 31: Kriittinen päällystepaksuus maabetonirakenteessa (Pospisil 1973).

Kun päällyste on kiinni maabetonissa, on kriittinen päällystepaksuus noin 70 % maabetonikerroksen paksuudesta.

Kun taas päällysteen ja maabetonin välissä on laakeripinta (esim. sitomaton kerros), on tarvittava päällystepaksuus 25 - 40 % maabetonikerroksen paksuudesta.

Maabetonin raudoittaminen on kokeissa pikemminkin lisännyt halkeilua kuin vähentänyt sitä (kuva 31). Pehmeän sideaineen käyttö tai esim. kumin lisäys päällysteeseen eivät kokeiluissa ole oleellisesti vähentäneet halkeilua.

Sementillä sidotun moreenikerroksen suunnittelussa tulee ottaa huomioon mahdolliset routanousut. Kokemuksen mukaan epätasaiset routanousut aiheuttavat sementillä sidottuun kantavaan sorakerrokseen ajan myötä halkeamia ja merkittäviä epätasaisuuksia (Bergstrand et al 1985).

### 3.2.3 Stabilointityön toteutus

#### 1) Toteutusmenetelmät

Stabilointimassan aineosat (kiviaines, sideaine, mahdollinen lisävesi ja lisäaineet) sekoitetaan liikkuvalla (tiesekoitus) tai kiinteällä (asemasekoitus) sekoittimella.

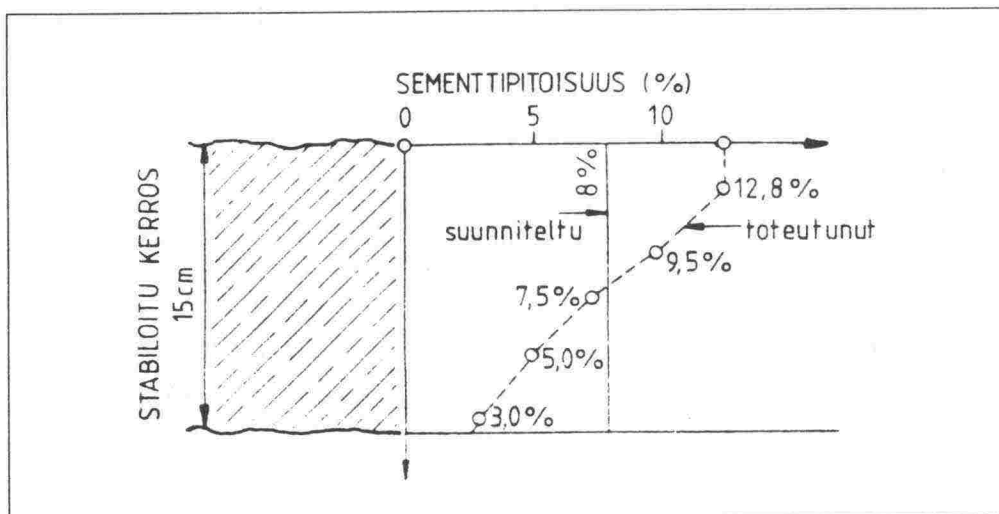
Liikkuvaa sekoitusta käytettäessä aineosasten sekoitus voi tapahtua tielinjalla kahdella eri tavalla. Ensimmäisessä tavassa (paikallasekoitus = mix-in-place) kone sekoittaa tielinjalle etukäteen levitetyn sementin ja maa-aineksen keskenään. Toisessa tavassa (liikkuva asemasekoitus = mix-in-travelling-plant) kone ottaa sekoitettavan kiviaineksen sisälleen ja sekoittaa siihen sementin, minkä jälkeen sekoitettu materiaali tulee suoraan tasaisena kerroksena tielle.

Kiinteällä sekoittimella massan sekoittaminen tapahtuu sekoitusasemalla (asemasekoitus), minkä jälkeen massa kuljetetaan työmaalle.

Kun massa valmistetaan asemasekoitusmenetelmällä, voidaan käyttää 20 % ohuempaa kerrosta (esim. 150 mm -> 120 mm) saman lujuuden ja kantavuuden saavuttamiseksi kuin tavanomaisella paikallasekoituksella. Sementtistabilointiohje (1992) sallii asemasekoituksessa pienemmän vähimmäissementtipitoisuuden (3,5 painoprosenttia) kuin tiesekoituksessa (4,5 painoprosenttia).

Käytettiinpä mitä sekoituslaitetta tahansa, sekoitus ei saa aiheuttaa erottumista sekoitettavassa massassa, toisin sanoen sekoittumisen tulee olla mahdollisimman tasaista. Huono sekoitus jättää maabetonin yläosaan suunniteltua enemmän ja alaosaan vastaavasti vähemmän sementtiä (kuva 32). Tästä aiheutuu yläosan liian suuri kutistuminen ja alaosan riittämätön lujuus. Maahan jääneet kuivat kokkareet alentavat puristuslujuutta ja pakkasenkestävyyttä.

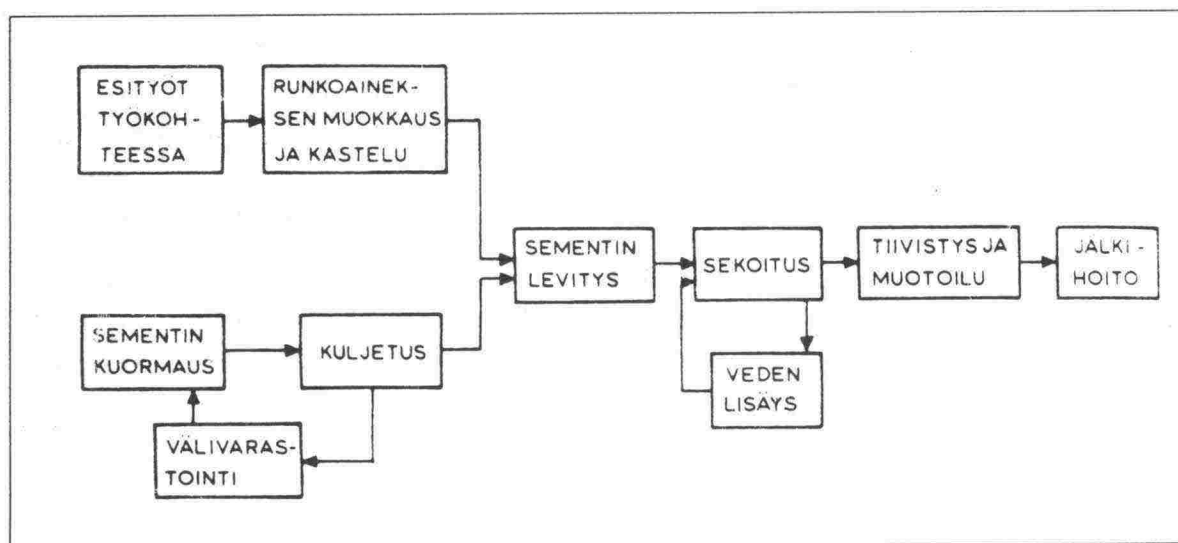




Kuva 32: Sementtipitoisuuden jakautuminen maabetonipoikkileikkauksessa (Kedzi 1973).

## 2) Paikallasekoitus (= mix-in-place)

Paikallasekoitusmenetelmässä repijälaitte rikkoo ensin maan määrättyyn syvyyteen, minkä jälkeen erikoiskone möyhentää maa-aineksen. Muokattuun maahan lisätään sementti ja sekoitetaan ensin kuivana ja sitten kosteana. Sen jälkeen maabetoni tiivistetään, tasoitetaan ja muotoillaan. Lopuksi huolehditaan maabetonin jälkihoidosta (kuva 33).



Kuva 33: Paikallasekoitusmenetelmän työvaiheet (Kankainen 1976).

Sementin sitoutuminen alkaa 2 - 4 tunnin kuluttua, jota ennen tiivistäminen tulee suorittaa. Jotta koneille ei tule turhia odotustunteja, on paikallasekoitusmenetelmässä stabilointi syytä tahdistaa esimerkiksi kuvan 34 mukaisesti.



Kuva 34: Stabiloinnin työvaiheiden tahdistus, kastelu tarvittaessa (Kankainen 1976).

Vesisateella stabilointityö voidaan joutua keskeyttämään, koska sade saat-  
taa kastella maabetonikerroksen ylikosteaksi ja tällöin kerros häiriintyy  
helposti.

#### Esityöt työkohteessa

Ennen varsinaista stabilointia joudutaan työkohteessa tekemään esitöitä,  
joita voivat olla esim.:

- työmaan perustaminen
- pohjan vahvistaminen
- routimisen torjunta ja tasoittaminen
- vanhan päällysteen poisto
- esimuokkaus ja kivien poisto
- alusrakenteen muotoilu ja tiivistys.

Perusmaan kantavuutta voidaan lisätä tehostamalla kuivatusta, mikä tulisi  
tehdä jo stabilointia edeltävänä kesänä. Lisäksi routivuutta tasoitetaan ra-  
kentamalla siirtymäkiiloja kohtiin, joissa on todettu pahoja routanousuja.

Vanhan päällysteen alla olevia kerroksia stabiloitaessa on vanha päällyste  
poistettava, koska bitumi tai tieöljy heikentää maabetonin lujuutta (Lind-  
gren).

#### Runkoaineksen muokkaus ja kastelu

Kun stabiloidaan paikalla olevaa materiaalia, on esimuokkaus sitä tär-  
keämpää, mitä tiiviimpää ja kivisempää maa-aines on. Piikkipuskurilla tai  
repijällä varustettu puskutraktori soveltuu esim. tiiviiksi iskostuneiden  
moreenien ja vanhan savisoratien repimiseen. Tiehöylällä voidaan muoka-  
ta hieman löyhempiä maa-aineksia. Varsinaiseen hienontamiseen käyte-  
tään stabilointijyrssiä tai piikki-, jousi- ja lautasäkeitä. Repimisen aikana  
poistetaan yli 50 mm kivet, jotta ne eivät riko stabilointikoneita.

Jos maaperä on kuiva ja kova, helpottaa kastelu muokkausta. Maabetoni  
kastellaan yleensä haihtumisen takia 1 - 2 prosenttiyksikköä yli optimikos-  
teuden. Hyvä tiivistyminen vaatii optimikosteuden, mutta päällysteen hal-  
keilun vähentäminen edellyttäisi vesipitoisuuden pienentämistä varsinkin,  
jos päällyste tulee välittömästi maabetonin päälle. Sivulle kääntyvillä kas-

telupuomeilla saadaan tasaisin kastelutulos eikä vesi valu ajouriin. Maabetonin sekoitusta tulee aina jatkaa kastelun jälkeen (Kankainen 1976).

Stabiloitavaan materiaaliin voidaan tarvittaessa lisätä ennen muokkausta jotain puuttuvaa lajitetta, tai jos humus neutraloidaan kalkilla, niin se tehdään repimisen aikana. Lopuksi kerros muotoillaan ja tasataan tiehöylällä sekä tiivistetään esim. kumipyöräjäyrällä. Tiivistäminen mahdollistaa koneiden liikkumisen varsinaisen stabiloinnin aikana.

Veden lisäys voi olla hankalaa moreenikerroksen tiivistymisestä johtuen. Työmaalla vettä lisättäessä tulisi tiivistynyt pinta löyhentää ennen veden lisäystä. Jos vettä joudutaan lisäämään paljon, tulisi moreeni-murskekerros rakentaa kahtena osakerroksena. Veden lisäys kannattaa tehdä vasta sekoituksen yhteydessä, jos se vain on mahdollista käytetyllä koneella.

#### Sementin käsittely ja levitys

Sementti levitetään 100 - 200 m matkalle kerrallaan. Pitempiä työosuuksia rajoittaa normaalin portlandsementin sitoutumisen alkaminen noin tunnin kuluttua levityksestä. Lisäksi massasta haihtuu vettä aurinkoisina ja tuulisina päivinä noin yksi prosenttiyksikkö tunnissa (Stabilointiohjeet 1973). Työosuudella käytettävä sementtimäärä  $\text{kg/m}^2$  voidaan laskea kaavalla 2.

$$S_A = 0,01 * S * \rho_k * h \quad (2)$$

jossa	$S_A$	on sementtiä ( $\text{t/m}^2$ )
	$S$	sementti painoprosentti
	$\rho_k$	kiviaineksen kuivairtitiheys ( $\text{t/m}^3$ )
	$h$	stabiloitavan kerroksen paksuus (m).

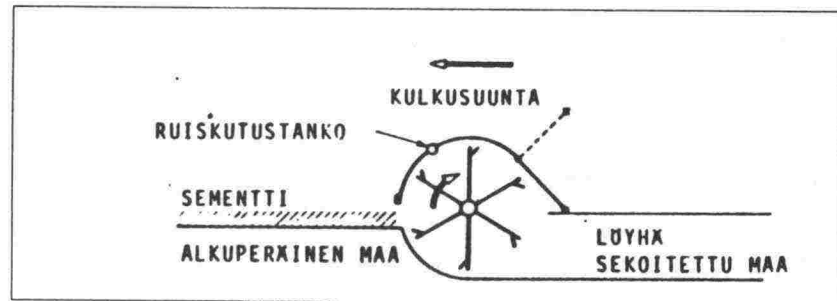
Sementti on pyrittävä levittämään mahdollisimman tasaisesti sekä pituus- että poikkisuunnassa. Levittimet voidaan jakaa itsekulkeviin, vedettäviin ja suoraan säiliövaunun perään kytkettäviin laitteisiin. Tavallisin on vetokoneen perään kytkettävä levitin. Useissa Euroopan maissa ovat myös yleisiä kuorma-autoon asennetut säiliöt levittimineen. Heikosti kantavalla pohjamaalla voidaan käyttää leveärenkaista suoajoneuvoa, joka soveltuu myös kasteluun. Sementtiä voidaan levittää myös ajoneuvon perään kytkettävillä suolan tai hiekan levittimillä (Lindgren 1980).

Sementin levitykseen kannattaa kuitenkin käyttää erityisesti siihen suunniteltuja laitteita, sillä normaalit kalkin levittimet eivät tahdo toimia kunnolla (Nousiainen 1989).

#### Sekoitus

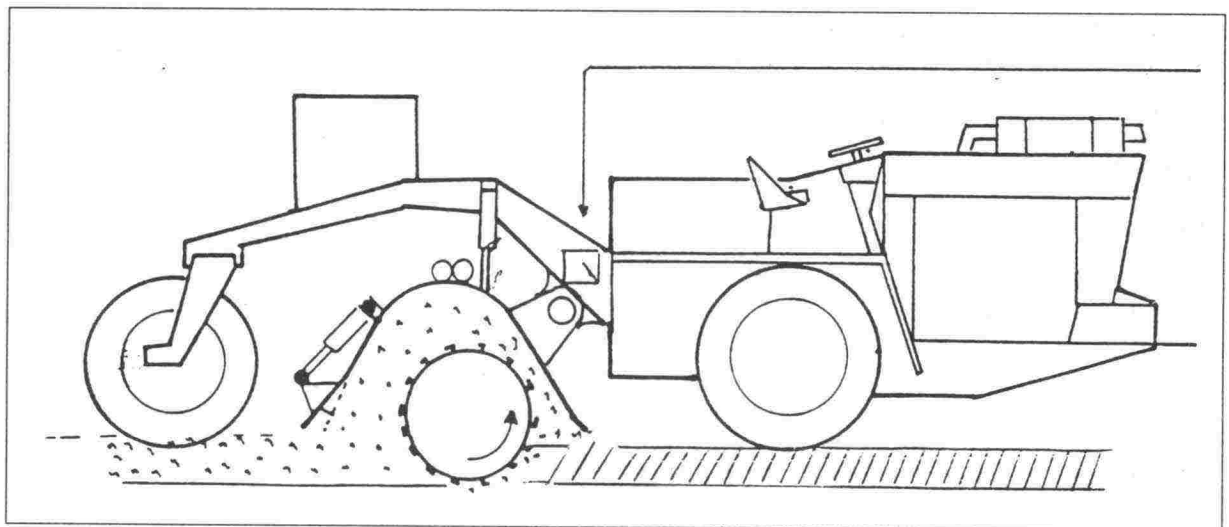
Stabilointijyrsimet jaetaan tarvittavien sekoitusajokertojen mukaan monikertasekoittimiin ja kertakäsittelysekoittimiin. Pienissä töissä sekoitus voidaan tehdä myös tiehöylällä, maatalousjyrsimellä tai äkeellä, mutta lopputuloksen tasalaatuisuuden varmistamiseksi ja nykyisin korkeiden laatuvaatimusten vuoksi sekoitus on syytä tehdä stabilointijyrsimellä. Stabilointijyrsimellä sekoitus tapahtuu yhden tai useamman vaakasuoran akselin tai rummun avulla, johon jyrsinterät on kiinnitetty. Akselin tai rummun pyörimissuunta on sekoituskoneen kulkusuunnalle vastakkainen (kuva 34).





Kuva 34: Stabilointijärsimen toiminta (Lindgren 1980).

Monikertasekoittimet ovat tavallisesti asennettu traktorin tai puskutraktorin perään. Massan sekoitussyvyys vaihtelee 20 - 60 cm riippuen sekoitus-koneen koosta ja tehosta. Keskimääräinen työsaavutus päivässä (8 h) vaihtelee 1000 - 6000 m<sup>2</sup> kaluston ja maaperän mukaan. Kertäkäsittelysekoittimilla saadaan sideaine ja maa-aines riittävästi sekoitetuksi yhdellä ajokerralla. Kertäkäsittelysekoittimeen voi myös olla kytkettynä tiivistyslaite. Suomessa käytettyjä kertäkäsittelylaitteita on mm. Caterpillar RR-250 (kuva 35). Ko. laitteen työpaino on 18 tonnia, työskentelyleveys 2,4 m ja suurin muokkaussyvyys 30 cm. Laitteiston työsaavutus päivässä (8 h) vaihtelee työolosuhteiden mukaan 4000 - 8000 m<sup>2</sup>.



Kuva 35: Stabilointijärsin (Sommer 1970).

Sementtistabilointiohje (1992) ja sementtistabiloinnin yleiset laatuvaatimukset ja työselitykset (1993) edellyttävät tiesekoituksessa sekoituskertojen lukumäärän osoittamista suunnitelmassa. Muussa tapauksessa sekoituskertoja on oltava kolme. Sama ohje edellyttää sekoituskertojen määrän tarkistamista koesekoituksella, mikäli hienoainemäärän ( $< \# 0,074$ ) läpäisyprosentti on yli 10 %.

Hienoainespitoisia moreeneja stabiloitaessa ennakkokokeet, myös koesekoitus, ovat tarpeellisia. Koesekoituksen yhteydessä tulee selvittää, voidaanko stabilointisekoittimen etenemisnopeutta ja rummun (mahdollista)

pyörimisnopeutta säätämällä päästä kertasekoituksella riittävän hyvään sekoitustulokseen.

#### Pinnan muotoilu ja tiivistys

Tiivistyminen riippuu tiivistettävästä materiaalista, tiivistettävän kerroksen alapuolella olevasta kerroksesta ja tiivistämiskalustosta.

Paras tiiviys saavutetaan hyvin suhteistuneella materiaalilla. Alla oleva kerros vaikuttaa siten, että mitä lujempi alusta on, sitä parempi tiiviysaste saavutetaan. Tiivistyskalusto vaikuttaa tiiviyteen siten, että mitä tehokkaampi tiivistyslaite, sitä suurempi on yleensä saavutettu tiiviysaste.

Maabetonia tiivistettäessä tulee vesipitoisuuden olla parannetun Proctor-kokeen antama optimivesipitoisuus  $\pm 1$  prosenttiyksikköä. Rakenteen alemmissa kerroksissa tulee maabetonin tiiviyden olla keskimäärin 95 % ja yksittäisen arvon 90 % Proctor-tiiviydestä (Maarakennusalan tutkimus- ja suunnitteluohjeita 1973). Jakavaa tai kantavaa kerrosta vastaavan maabetonikerroksen tiiviyden tulee olla keskimäärin 97 % ja yksittäisen arvon 92 % parannetusta Proctor-tiiviydestä (Sementtistabilointiohje 1992).

Kun stabilointi on ehtinyt niin pitkälle, että jyräykselle saadaan tilaa, aloitetaan se tavalliseen tapaan työalueen reunoilta ja siirrytään sitten aina lähemmäksi keskilinjaa.

Välittömästi sekoituksen jälkeen pinta muotoillaan tiehöylällä ja aloitetaan tiivistys. Yleisimmin käytetään kumipyöräjäriä, mutta myös sileävalssiäjäriä ja täryjäriä voidaan käyttää. Kumipyöräjäjän rengaspaineen tulee esijäryksessä olla alhainen ja varsinaisessa tiivistysjäryksessä painetta nostetaan. Järyskertoja tarvitaan 6 - 12 (Kankainen 1970, Markkanen 1969). Staattisen esijäryksen jälkeen (1 - 3 ajokertaa) voidaan myös käyttää täryä (2 - 3 ajokertaa). Kevyillä täryjäryillä on usein saatu parempi tiiviys kuin kumipyöräjäryillä (Annala 1974, Sloth 1970). Mikäli tiivistyksen aikana tulee liikaa epätasaisuutta, voidaan pinta repiä tiehöylällä ja tasoittaa painanteet. Lopputiivistys tehdään kumipyöräjäryillä tai sileävalssiäryillä (Lindgren 1980).

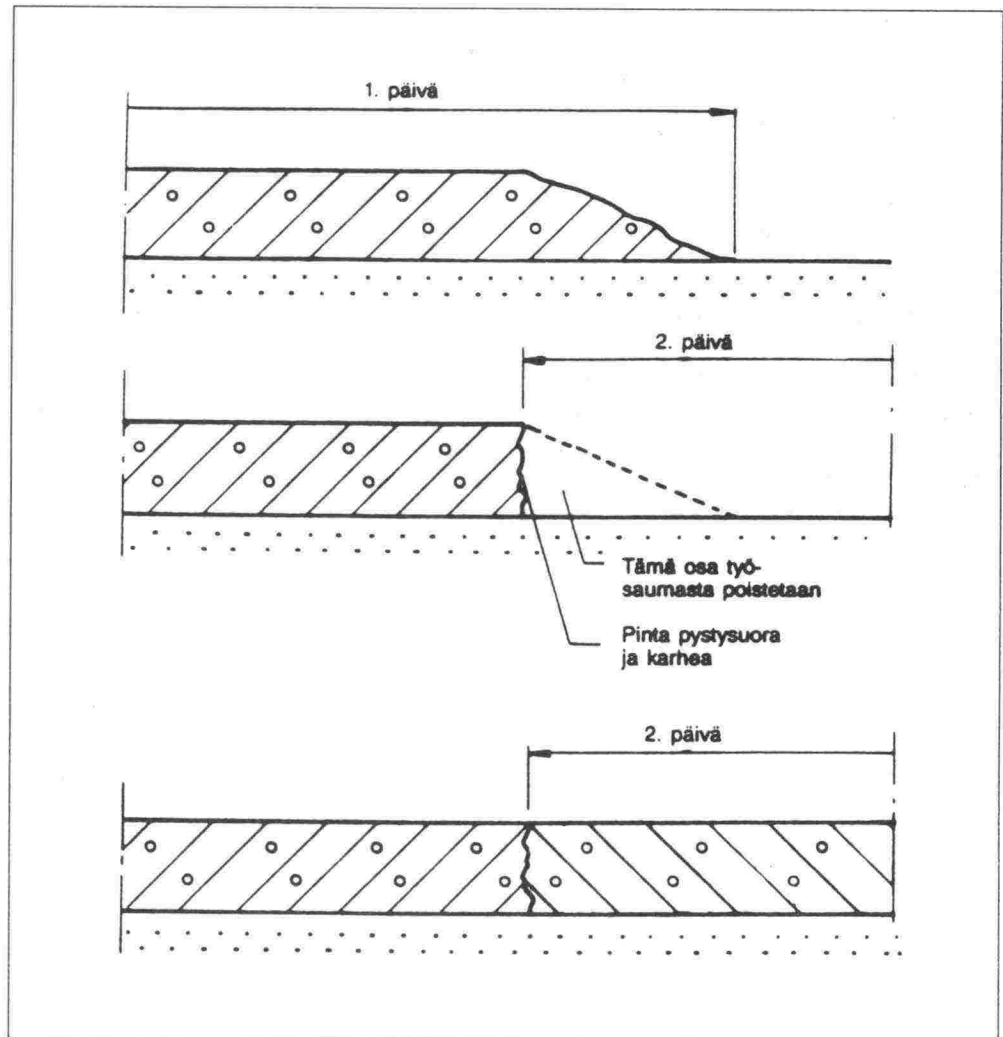
Hämeen piirissä tehdyistä stabilointitöistä saatujen kokemusten perusteella maabetonin esitiivistykseen suositellaan kumipyöräjäriä ja jälkitiivistykseen täryjäriä. Tehdyissä stabilointitöissä, stabiloidun moreenimurskeen levityksessä, tasaamisessa ja tiivistämisessä ei ilmennyt erityisempiä ongelmia. Jos stabiloitu moreenimurske ei ole liian kosteaa, on se hyvin käsiteltävissä. Kun kerros on tiivistetty, kestää sen pinta melko hyvin rasitusta. Vesisateella pinta liettyy ja häiriintyy, joten moreenimurskeen päälle olisi hyvä levittää suojaava murskekerros mahdollisimman pian (Nousiainen 1989).

Sementin sitoutuminen alkaa 2 - 4 tunnin kuluttua sekoittumisesta, jonka jälkeen syntyneet sidokset rikkoutuvat massaa häiritäessä. Maabetoni tulee tiivistää kahden tunnin kuluessa sementin levityksestä (Sementtistabilointiohje 1992). Yleensä paras lujuus saavutetaan tiivistämällä massa välittömästi sekoituksen jälkeen. Tosin eräissä tutkimuksissa on saavutettu suurempia lujuuksia suorittamalla tiivistys vasta sementin sitoutumisen alettua.

### Työsaumat

Maabetoniin joudutaan tekemään työsaumoja töiden keskeytyessä niin, että maabetoni ehtii kovettua tai stabiloitaessa kaista kerrallaan. Työsauma tehdään repimällä jo kovettunutta maabetonia esim. tiehöylän terän kullamalla riittävän pitkälti irti ainakin niin, että maabetonin paksuus on vaadittu. Työ voidaan tehdä myös erityisellä leikkurilla.

Päiväetenemisten välisten poikkisaumojen (työsaumojen) järjestely maabetonikerroksessa tapahtuu niin, että päivän työ lopetetaan tekemällä työsauma kaltevaksi. Seuraavan päivän työ aloitetaan poistamalla työsauman kalteva osa niin, että saavutetaan pystysuora saumapinta täydellä kantavan kerroksen paksuudella. Uuden massan levitys aloitetaan rosoisesta pystysuorasta saumapinnasta (kuva 36). Jos työsauman kaltevaa osaa ei poisteta, lämpöliikkeet voivat aiheuttaa "leikkausvaurioita" sauma-alueella.



Kuva 36: Esimerkki poikkimenevän työsauman muotoilusta (Lindgren 1980).



### Jälkihoito

Maabetonikerros on pidettävä kastelun avulla kosteana noin viikon ajan. Kastelun sijasta voidaan kerros suojata myös märällä säkkikankaalla, muovikelmulla tai bitumiemulsion tai -liuoksen avulla. Bitumiemulsiota käytetään  $0,8 - 1,0 \text{ kg/m}^2$ . Ensimmäisen viikon aikana tulisi liikenne rajoittaa mahdollisimman vähiin (Stabilointiohjeet 1973). Jos käytetään muovikalvoa, pidetään sitä paikoillaan niin kauan kuin mahdollista, mutta vähintään 4 - 5 päivää.

Tiesekoitusmenetelmässä (mix-in-place) on seuraavia etuja ja epäkohtia.

Etuja:

- koneet ovat yksinkertaisia, halpoja ja helppoja siirtää
- koneiden lukumäärä voidaan järjestää työn laajuuden mukaan.

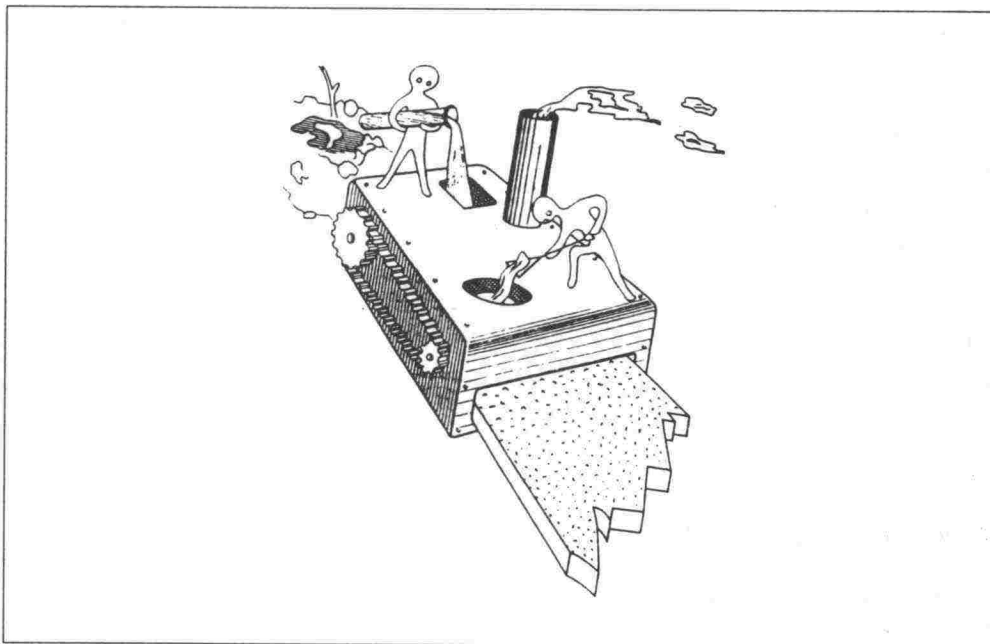
Epäkohtia:

- tasaista kerrospaksuutta on vaikea saavuttaa
- sekoittuminen on epätasaista.

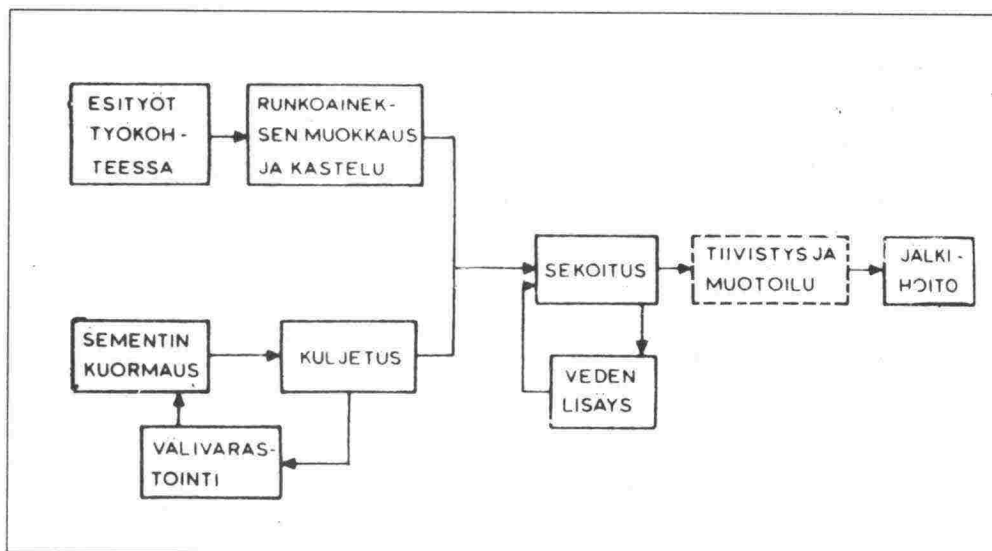
Nykyaikaiset suuret paikallasekoituskoneet eivät ole halpoja, mutta työtu-  
los on huomattavasti parempi kuin kevyillä sekoittimilla.

### **3) Liikkuva asemasekoitusmenetelmä (mix-in-travelling-plant)**

Liikkuvassa asemasekoitusmenetelmässä hitaasti eteenpäin liikkuva stabi-  
lointikone nostaa karheelle revityn maan sekoitusrumpuunsa, jossa maa  
edelleen möyhennetään ja sekoitetaan sementin sekä mahdollisesti lisättä-  
vän veden kanssa. Valmis massa tulee koneesta ulos tasaisena kerroksena.  
On myös koneita, jotka lisäksi tiivistävät kerrokset. Päivittäinen työsaavu-  
tus on  $12000 - 20000 \text{ m}^2$  (Kedzi 1973) (kuvat 37 ja 38).



Kuva 37: Liikkuva asemasekoitusmenetelmä (Lindgren 1980).



Kuva 38: Liikkuvan asemasekoitusmenetelmän työvaiheet.

Liikkuvassa asemasekoitusmenetelmässä tehdään soveltuvien osien stabiloidinnin eri osatyövaiheet kuten paikallasekoitusmenetelmässä. Osatyövaiheista jää pois sementin levitys. Myös tiivistys voi jäädä pois, jos kone tiivistää massan samantien.

Liikkuvan asemasekoitusmenetelmän (mix-in-travelling-plant) etuja ja epäkohtia ovat:

## Etuja:

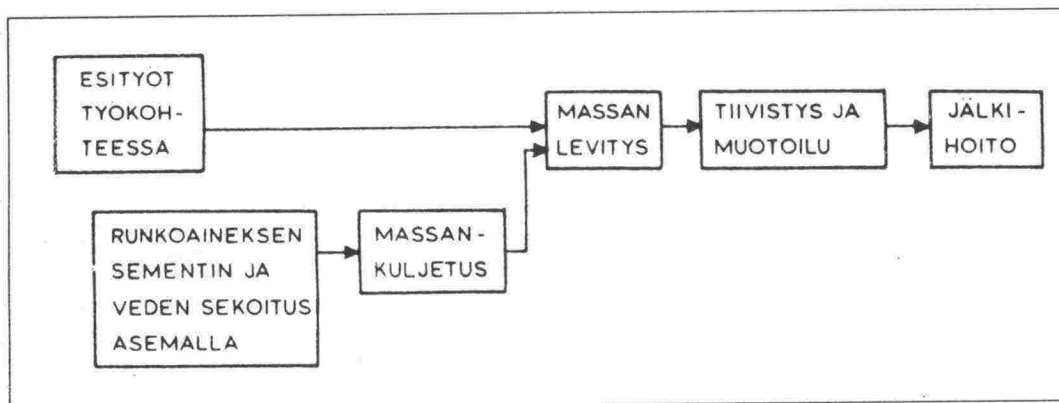
- tarkka annostus
- tasainen sekoittuminen
- lyhyt sekoitusaika
- käsitellyn kerroksen pinta on tasainen eikä kerrospaksuus vaihtele
- suuri kapasiteetti.

## Epäkohtia:

- suuret investointikustannukset
- suuren kapasiteetin hyväksikäyttö on monesti vaikeaa
- vioittuneen koneen korjaus on hidasta ja kallista.

**4) Asemasekoitusmenetelmä**

Asemasekoitusmenetelmässä valmistetaan stabilointimassa sekoitusasemalla, josta massa kuljetetaan rakennuspaikalle. Massa levitetään tiivistetylle ja muotoillulle pinnalle, jonka jälkeen maabetonikerros tiivistetään ja muotoillaan oikeaan tasoon (kuva 39).



Kuva 39. Asemasekoitusmenetelmän työvaiheet (Kankainen 1976).

Esityöt kohteessa

Asemasekoitusmenetelmässä mahdollisia esityitä ovat:

- pohjan vahvistaminen
- routimisen torjunta ja tasoittaminen
- vanhan päällysteen poisto
- alusrakenteen muotoilu ja tiivistys
- työmaan perustaminen.

Esityöt tehdään kuten vastaavat esityöt paikallasekoitusmenetelmässä.

Massan sekoitus asemalla

Kiinteällä sekoitusasemalla massa valmistetaan tavallisella pakkosekoittimella, joka toimii annos- tai jatkuvasekoitusperiaatteella. Massan sekoitusajan on oltava 0,5 - 1 min siitä lukien, kun kaikki ainekset on lisätty sekoit-



timeen (Kankainen 1976, Markkanen 1970). Päivittäinen (8 h) työsaavutus vaihtelee 300 - 2000 m<sup>2</sup> (Kezdi 1973, Markkanen 1973).

### Massan kuljetus

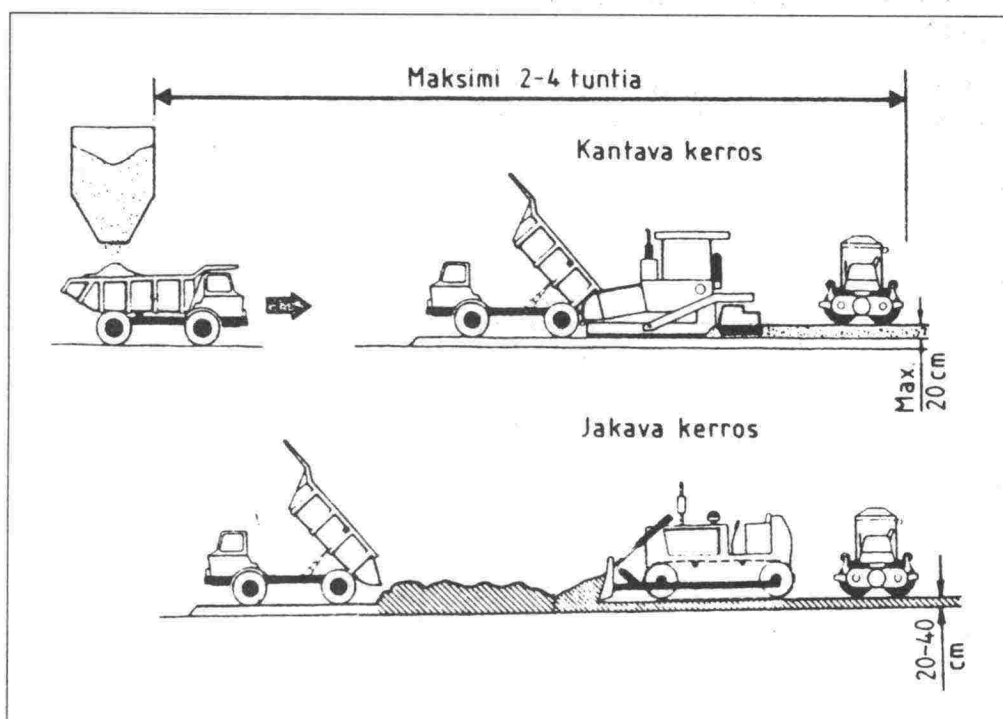
Sekoitettu massa kuljetetaan työkohteeseen kuorma-autoilla. Kuljetuksissa on varauduttava massan peittämiseen sateella tai haihtumisen ollessa runsasta (lämmin ja tuulinen sää).

### Massan levitys

Stabiloidun massan levitys voidaan tehdä mm.:

- tiehöylällä (mahdollisesti laser-ohjaus)
- asfalttilevittimellä edellyttäen, että levitintä voidaan säätää haluttuun kerrospaksuuteen
- ns. levityskelkalla, joka kiinnitetään kuljetusauton taakse ja joka levittää massaa sekä tasoittaa levitetyn seoksen.

Yleensä massa levitetään asfaltinlevittimellä. Pienissä kohteissa tai jakavan kerroksen stabiloinnissa voidaan massa tyhjentää kuorma-autoista kerroksittain ja tasoittaa puskutraktorilla tai tiehöylällä, mutta tulos on huonompi kuin asfaltinlevittimellä (kuva 40).



Kuva 40: Asemasekoitteen massan levitys (Egmond 1976).

Kerros levitetään tavallisesti yhtenä kerroksena täyteen paksuuteen. Jos kerros tehdään useampana lamellina, tulee alempi kerros jättää tiivistämättä ja ylempi kerros levittää noin tunnin kuluessa (märkä märän päälle). Työtä suunniteltaessa tulee aina pyrkiä siihen, että työalue saadaan sama-

na päivänä koko leveydeltään valmiiksi. Näin vältetään pitkittäisiltä vuorokausisaumoilta.

Tiehöylälevitystä käytettäessä kuorma-auto ei kippaa massaa yhdeksi läjäksi, vaan esilevittää materiaalin "vetää massan matoksi". Tiehöylän etuja ovat suuri työleveys, vältetään pitkittävät työsaumat kaistojen välillä, kallistukset helppo tehdä. Asfalttilevittimellä voidaan käyttää korkeintaan 3,5 m työleveyttä ja levityskelkalla 2,5 m.

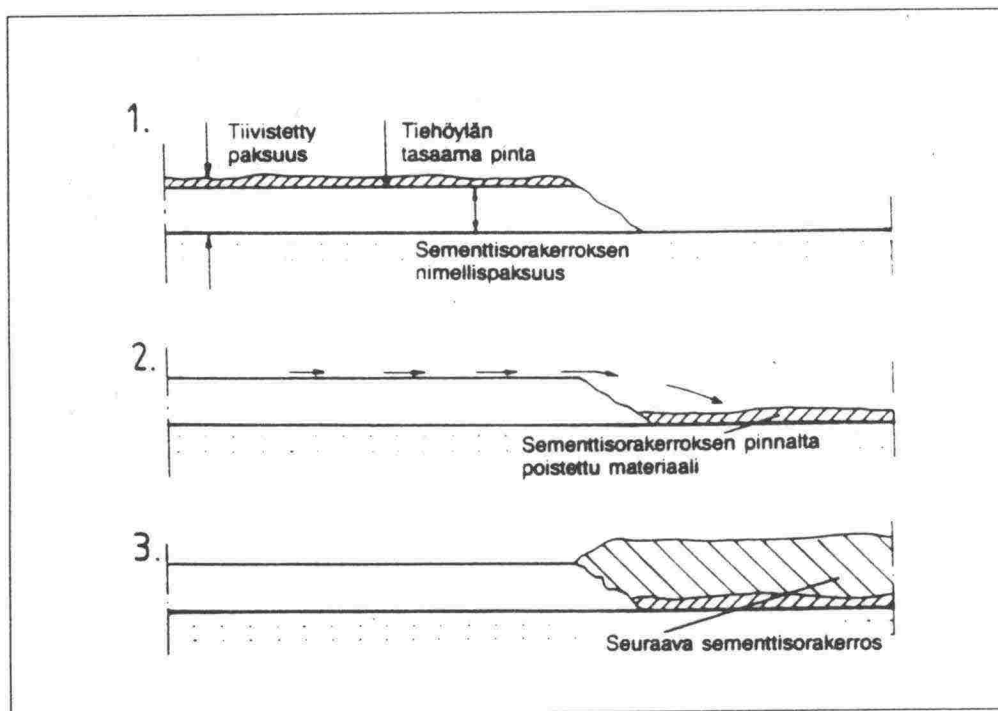
Asfalttilevittimen ja levityskelkan etuja ovat, että kerros tulee kerralla oikeaan tasoon. Näin vältetään ohuet tasauserrokset. Liukuvalulevittimen etu on automaattinen kerrospaksuuden säätö.

Kerros levitetään 10 - 15 % ylipaksuuteen tiivistysvaran takia.

Maabetonikerroksen levittäminen "Mora-menetelmällä"  
(Bergstrand et al 1985).

Ensimmäisessä työvaiheessa maabetonikerros levitetään tiehöylällä tasa-paksuksi kerrokseksi niin, että tietty ylipaksuus (2 - 3 cm) säilyy jyräyksen jälkeenkin. Tämän jälkeen "revitään" tiehöylällä kerroksen pinta oikeaan tasoon. Lopullisen pinnan aikaansaaminen voi vaatia kevyttä jyräystä. Irtirevitty pintamateriaali, joka voi olla hieman vähemmän kivistä ja kuivempaa kuin alla oleva maabetonikerros, työnnetään eteenpäin päällystys-suunnassa ja levitetään tuoreen maabetonikerroksen reunan eteen (ks. kuva 41).

Mora-menetelmässä saadaan pintamateriaaliksi karkeampaa/kivisempää ainesta ja liian nopeasti kuivunut pintamateriaali voidaan poistaa.



Kuva 41: Levitys "Mora-menetelmällä" (Bergstrand et al 1985).

### Tiivistys ja muotoilu

Asfaltti- tai liukuvalulevittimellä työskenneltäessä sementillä sidottu kerros saa tietyn alkutiiviyyden ja lopullinen tiivistys voidaan aloittaa välittömästi. Tiehöylälevityksessä on sitä vastoin välttämätöntä suorittaa esitiivistys (esim. kumipyöräjyrällä tai tavallisella jyrällä täryttämättä), jotta pinnasta tulee riittävän luja kestämään tiivistyksen täryjyrällä. Asemasekoitteinen materiaali tulee tiivistää 2 tunnin kuluttua siitä, kun materiaali on lähtenyt betoniasemalta (Sementtistabilointiohje 1992).

### Työsaumat ja jälkihoito

Työsaumat ja jälkihoito tehdään kuten paikallasekoitusmenetelmässä.

Kiinteän asemasekoitusmenetelmän (mix-in-plant) etuja ja epäkohtia ovat:

Etuja:

- tarkka annostus
- tarkka kerrospaksuus
- massa voidaan suhteuttaa useammastakin kiviaineksesta.

Epäkohtia:

- kallis.



### 3.2.4 Stabilointityön valvonta

Alla olevassa taulukossa 7 on esitetty luettelonomaisesti, mitä stabilointityön valvonnassa tulee huomioida. Jokaisesta kohdasta on jäljempänä tarkempi selitys.

Taulukko 7: *Stabiloinnin valvonta* (Henk 1972, Sommer 1969, Sementtistabilointiohje 1992).

Valvonta ennen stabilointia	
1.	Maalajiominaisuudet samat kuin ennakkokokeissa?
2.	Yli 60 mm kivet poistettu?
3.	Maapohjan profiili oikea ja tiiviys tasalaatuinen?
4.	Onko kuivatus tai ennakkokastelu tarpeellinen?
5.	Viemäri- ja sadevesikaivot madallettu ja peitetty?
6.	Kalusto sovelias ja käyttökunnossa?
Stabiloinnin valvonta	
1.	Lämpötila yli +5 °C
2.	Hienoainekokkareet rikottu?
3.	Vesipitoisuus?
4.	Sementtipitoisuus?
5.	Sekoitus?
6.	Keskeytykset
7.	Sateet
8.	Tiiviys ja kerrospaksuus?
9.	Lujuus?
10.	Työsaumat
11.	Vauriot heti koko kerrospaksuudelta korjattu
12.	Kirjanpito
Valvonta stabiloinnin jälkeen	
1.	Jälkihoito ajoitettu oikein
2.	Sivukaltevuus, korkeusasema ja tasaisuus?
3.	Lujuus?
4.	Kantavuus?
5.	Liikkumisen rajoittaminen

#### Valvonta ennen stabilointia

##### Maalajiominaisuudet

Esitöiden aikana tarkkaillaan seulontakokeilla, onko rakeisuus sama kuin ennakkokokeissa. Jos huomattavaa poikkeamaa esiintyy suurehköllä alueella, on kiviaineksesta tehtävä uudet ennakkokokeet ja määritettävä stabilointiohjearvot uudelleen. Humuskoe tehdään, jos on syytä epäillä humuspitoisuuden olevan suurempi kuin ennakkokokeissa.

##### Kivisyys

Yli 50 mm kivet tulee poistaa stabilointisyvyydeltä että sekoitin ei rikkoudu. Suurimpien kivien paikalle tasattu maa tulee tiivistää ympäristön tiiviyteen.

##### Stabilointialusta

Pohjamaassa tulee olla oikea profiili ja korkeus. Sen tulee olla tasainen ja tiivistetty tasalaatuiseksi, koska muuten stabiloidun kerroksen korkeusase-  
ma, tasaisuus tai paksuus poikkeaa tavoitteesta. Tiiviyden tasalaatuisuus

voidaan arvostella tiehöylän tai kuorma-auton pyörien painumista stabiloitavalla alueella.

#### Vesipitoisuus

Jos liian kuivassa maassa on hienoainekokkareita, kannattaa pohjamaa kastella stabilointia edeltävänä päivänä, jotta vesi ehtii pehmentää kokkareet. Mikäli maa on liian kosteaa, voidaan maan muokkauksella nopeuttaa kuivumista.

#### Stabiloituun kerrokseen tulevat rakenteet

Mahdolliset viemäri- ja sadevesikaivot tulee madaltaa ja peittää lankuilla, jotka jäävät vähintään 5 cm stabiloitavan kerroksen alapuolelle. Näin voidaan stabilointi tehdä nopeasti. Stabiloinnin jälkeen poistetaan suojalankut ja kootaan rakenteet.

#### Kalusto

Kaikkien koneiden ja kalustojen kunto ja soveltuvuus stabilointiin tulee tarkistaa. Koska esimerkiksi työssä rikkoutunut sekoitin täytyy pystyä heti korvaamaan toisella, on varmistettava myös varakoneiden saanti.

### **Stabiloinnin valvonta**

#### Lämpötila

Stabiloinnin aikana lämpötila ei saa laskea alle +5 °C, eikä myöskään 2 viikkoa sen jälkeen, jotta maabetoni ehtii saavuttaa riittävän lujuuden ennen jäätymisvaaraa. Jos joudutaan stabiloimaan lähellä +5 °C, kannattaa käyttää 20 kg/m<sup>3</sup> suurempaa sementtipitoisuutta, suuren alkulujuuden omaavaa sementtiä tai kalsiumkloridia kiihdyttämään sitoutumista (Sommer 1970).

#### Hienoaineksen rikkominen

Jos maassa on hienoainekokkareita, tulee niiden rikkoutuminen tarkistaa ennen stabilointia. Maa seulotaan 4 mm ja 20 mm seuloilla. Yli 20 mm maakokkareita ei saa esiintyä ja rikkoutumisasteen tulee olla vähintään 80 % (Sommer 1970).

$$\text{Rikkoutumisaste (\%)} = \frac{4 \text{ mm läpäisyprosentti}}{4 \text{ mm läpäisyprosentti} + \text{yli 4 mm kokkareet}} \quad (3)$$

#### Vesipitoisuus

Vesipitoisuus voidaan mitata karbidometrillä, kunhan tuloksia verrataan välillä kuivatusmenetelmän tuloksiin. Tiivistyksen alkaessa tulee vesipitoisuuden olla  $\pm 1$  prosenttiyksikön tarkkuudella optimissa. Ennen sementin levitystä voi maan kosteus olla 1 - 2 prosenttiyksikköä yli optimin, sillä sementin lisäys kuivattaa seosta 1 - 2 prosenttiyksikköä (Stabilointiohjeet 1973).

### Sementtipitoisuus

Sementtipitoisuutta tarkkaillaan asettamalla neliömetrin suuruinen näyte-laatikko, muovi tai kangas stabiloitavaan kohtaan. Sementin levityksen jälkeen punnitaan näyte. Määrityksiä tehdään työn alussa vähintään yksi jokaista 500 m<sup>2</sup> stabiloitavalta osalta. Työn edistyttyä riittää yksi näyte jokaista alkavaa 4000 m<sup>2</sup> kohden. Maabetonitoissa työvuoroittain käytetty keskimääräinen sementtimäärä saa poiketa ohjearvosta enintään ± 3 % ja yksittäinen arvo enintään ± 5 %.

### Sekoitus

Sekoituksen hyvyttä arvostellaan koekuoppien tai stabiloitavan alueen poikki kaivetun ojan avulla. Massan tulee olla tasaisen harmaa koko syvyydeltään. Epäilyttävissä tapauksissa voidaan puristuslujuuskokeilla tarkistaa sekoituksen tehokkuus. Koekappaleet tehdään parannetulla Proctor-menetelmällä heti massasta sellaisenaan sekä tehokkaan laboratorio- tai käsisekoituksen jälkeen. Seitsemän vuorokauden puristuslujuustuloksista voidaan laskea sekoitusaste.

$$\text{Sekoitusaste} = \frac{\text{stabilointikoneella sekoitetun koekappaleen puristuslujuus}}{\text{lisäsekoitetun koekappaleen puristuslujuus}} \quad (4)$$

Sekoitus on hyvä, jos sekoitusaste on  $\geq 90$  % ja vielä riittävä, jos sekoitusaste on  $\geq 70$  % (Sommer 1970).

### Keskeytykset

Sementti tulee levittää vasta välittömästi ennen sekoitusta ja tiivistyksen tulee alkaa heti sekoituksen jälkeen. Tilapäinen keskeytys sekoituksessa saa olla korkeintaan 30 minuuttia (Sommer 1970). Tiivistyksen tulee olla valmis kahden tunnin kuluttua sementin levityksestä. Jos työ keskeytyy yli kahdeksi tunniksi, on tehtävä poikkisuuntainen työsauma.

### Sateet

Rankkasateen uhatessa stabilointi on keskeytettävä ja alle puolen vuorokauden ikäinen maabetoni on peitettävä.

### Tiiviys

Tiiviyttä arvostellaan tiiviysasteen perusteella.

$$\text{Tiiviysaste} = \frac{\text{stabiloidun maan kuivairtoteiheyys}}{\text{Proctor-tiiviys}} \times 100 \quad (5)$$

Stabiloidun maan kuivairtoteiheyys määritetään volymetrillä. Tiiviyttä on seurattava työn alussa tarkimmin, vähintään 12 koekappaleella ensimmäisessä työvuorossa ja sen jälkeen kaksi koekappaleella jokaista alkavaa 2000 m<sup>2</sup> kohden. Tiiviydenvälvonta voidaan tehdä myös Troxler-laitteella tai muilla vastaavilla laitteilla. Tehdyistä koekappaleista määritetään myös puristuslujuus (Sementtistabilointiohje 1992).



Parannetun Proctor-kokeen koekappaleet on sullottava tunnin kuluessa sementin lisäyksestä.

Proctor-tiiviyden määrittämiseen käytetyt koekappaleet puristetaan seitsemän, tai osin yhden, vuorokauden kuluttua. Puristuslujuutta verrataan ennakkokokeiden lujuuskehitykseen. Puristuslujuuden keskiarvotavoitteen toteutuminen arvioidaan Sementtistabilointiohjeessa (1992) kohdassa 6.5 esitetyllä tavalla.

Tiesekoitteisen maabetonin porakoekappaleen puristuslujuuden yksittäinen tulos ei saa ylittää suunniteltua lujuutta yli 50 % eikä alittaa sitä yli 30 % (Sementtistabilointi, yleiset laatuvaatimukset ja työselitykset 1993).

### Valvonta stabiloinnin jälkeen

#### Korkeusasema ja tasaisuus

Kaltevuus- ja korkeustasomittaukset tehdään laadunvalvontaohjeen TIEL 732 816 mukaan.

Tasaisuusvaatimus on sama, mikä vaaditaan ko. rakennekerrokselta sitomattomana. Asfaltin tai betonirakenteen alla olevan maabetonin tasaisuusvaatimus on  $\pm 16$  mm. Tasaisuusmittaus tehdään 5 m oikolaudalla sekä pituus- että poikkisuuntaan 20 m välein (Sementtistabilointiohje 1992).

Vaatimuksia (taulukko 8) suuremmat virheet korkeudessa ja tasaisuudessa on yleensä korjattava välittömästi.

Taulukko 8: Korkeus- ja tasaisuusvaatimukset (Laadunvalvontaohjeet TIEL 732 816).

Kerros	Päällysrakenne luokka	Suurin sallittu yksittäinen poikkeama mm	Suurin sallittu epätasaisuus 5 m matkalla mm
Suodatin	1...6	-50...+50	50
Jakava	1...6	-40... 0	30
Kantava	1...6	-20...+20	20
Alusrakenne		-100... 0	-
Louhepengker ja irtilouhint		-40 ...+20	-
Matalan louhepenkereen alla maapenger		-200 .. 0	
Kulutuskerros (sitomaton)			15

#### Kantavuus

Kantavuus mitataan levykuormitus- tai pudotuspainolaitteella aikaisintaan 7 vrk:n, mutta mieluummin kuukauden kuluttua maabetonin teosta. Kantavuusmittauksia tehdään 50 (-200) metrin välein kultakin kaistalta vuorotellen.

### Liikkumisen rajoittaminen

Liikenne voidaan laskea maabetonin päälle, kun maabetonin puristuslujuus on vähintään  $2 \text{ MN/m}^2$ . Maabetoni, jonka suunnittelulujuus on vähintään  $4 \text{ MN/m}^2$ , kestää kevyttä henkilöautoliikennettä jo 1 vrk:n ikäisenä ja raskasta liikennettä 3 vrk:n ikäisenä. Jos maabetonin runkoaines on murskettä ja alustan kantavuus vähintään  $100 \text{ MN/m}^2$ , maabetoni kestää myös vähäistä raskasta liikennettä jo 1 vrk:n ikäisenä (Sementtistabilointi-ohje 1992).

### **Valvonta asemasekoitusmenetelmässä**

Kiinteällä sekoitusasemalla on massa tasalaatuisempaa ja valvonta siten helpompaa. Valmiin massan ja maabetonin osa-ainesten punnitukseen käytettävien vaakojen mittatarkkuus on oltava  $\pm 2,0 \%$ .

Tavanomainen sekoitusaika on 45 - 60 s. Runsas hienoainesmäärä vaatii pidemmän sekoitusajan.

Aurinkoisina, sateisina tai tuulisina päivinä on massa suojattava pitkillä kuljetusmatkoilla.

## **3.3 Kalkkistabilointi**

### **3.3.1 Perusteet (Stabilointiohjeet, 1973)**

Kalkilla lujittamiseen soveltuvat saviset ja silttiset maalajit. Hienoainespitoisuuden tulisi olla  $0,074 \text{ mm}$  kohdalla mieluummin yli 35 %. Karkearakeisilla mailla, jotka ovat lujituksen tarpeessa, kalkin käyttömahdollisuuden ratkaisevat kaksi seikkaa: sisältääkö maa-aines riittävästi reaktioaktiivisia aineksia (savipitoisia hienoaineita) ja toiseksi, onko maa-aineksen kiviisyys niin pieni, että työn suorittaminen käytännössä on mahdollista. Oikein tehtynä kalkkistabiloinnilla voidaan lisätä hienorakeisten, vähäkvisten moreenialusrakenteiden kantavuutta ja vähentää alusrakenteen painumista. Liejuisten ja juoksevassa tilassa olevien maalajien lujittamiseen kalkki ei sovellu.

Seuraavassa tekstissä on käytetty terminologiaa, jossa maa-aineksen sitomisesta kalkilla käytetään yleisnimitystä kalkkistabilointi. Korkealuokkaita kalkkistabilointia kutsutaan maakalkiksi (vrt. maabetoni). Kalkkistabiloitu kerros vastaa käsitteenä sementillä käsiteltyä kerrosta tai laihaa maabetonia.

Stabilointitarkoituksiin käytetään kahta kalkkilaatua, poltettua kalkkia ( $\text{CaO}$ ) ja sammutettua kalkkia ( $\text{Ca(OH)}_2$ ). Teknisessä mielessä ne eivät ole täysin samanarvoisia, vaan 1 osa  $\text{CaO}$  vastaa  $1,32$  osaa  $\text{Ca(OH)}_2$ .

Reagoidakseen maalajin hienojakoisimman osuuden kanssa, kalkin tulee olla hydraattina,  $\text{Ca(OH)}_2$ , josta muodosta se voi helposti hajaantua. Käytettäessä poltettua kalkkia, tulee sen ensin "sammua", jotta ioninvaihtoreaktiot voisivat alkaa. Poltetu kalkki ( $\text{CaO}$ ) sitoo sammuaan vettä ja luovuttaa samalla runsaasti lämpöä. Poltetun kalkin käytön etuja ovat:



- tarvitaan 24 % vähemmän kuin sammutettua kalkkia
- voidaan käyttää vapautuvan reaktiolämmön johdosta viileämpänä aikana kuin sammutettua kalkkia
- kuivattaa stabiloitavaa maata enemmän kuin sammutettu kalkki, johtuen veden sitoutumisesta ja vapautuvan kalkin lämmön aiheuttamasta haihtumisesta.

Poltetun kalkin käytön haittapuolena on reaktioherkkyys ja silmiä ja hengityselimiä ärsyttävä vaikutus.

Sekoittaessa kalkkia kosteaan maa-ainekseen osa kalkista hajaantuu ioneiksi. Hajaantuneen kalkin  $\text{Ca}^{++}$ -kationit syrjäyttävät heikompidoksiset  $\text{Na}^{+}$ -,  $\text{H}^{+}$ - ja  $\text{K}^{+}$ -kationit negatiivisten savimineraalien pinnalta. Ioninvaihtoreaktiot alkavat pH-arvon ollessa vähintään 8 (Rakentajainkalenteri 1989, osa 1). Nämä ioninvaihtoreaktiot tapahtuvat muutamien minuuttien kuluttua ja loppuvat täysin 4 - 8 tunnin kuluttua kalkin sekoituksesta. Ioninvaihtoreaktioiden tapahtuessa maa-aineksen raerunko muuttuu karkeammaksi savihiukkasten liittyessä kiinteämmin toisiinsa. Nopeiden reaktioiden seurauksena maalajissa tapahtuu seuraavia muutoksia:

- vesipitoisuus laskee
- eroosio- ja häiriintymisherkkyys vähenee
- tiivistysominaisuudet paranevat
- leikkauslujuus kasvaa.

Kalkilla käsitellyn maa-aineksen vesipitoisuus pienenee 4 - 10 prosenttiyksikköä riippuen kalkkimäärästä, sääolosuhteista, sekoituksen tehokkuudesta ja kestoajasta. Poltettua kalkkia käytettäessä kalkin sammumisen yhteydessä veden höyrystymisen johdosta tapahtuva vesipitoisuuden pieneminen saattaa olla 1 - 2 prosenttiyksikköä käytettyä  $\text{CaO}$ -prosenttiyksikköä kohti.

Varsinainen lujittuminen kalkilla käsitellyssä maalajissa alkaa vasta sitten, kun osa kalkista muodostaa maalajissa jo olevien saven mineraalien kanssa sementtiliiman kaltaisen sideaineen. Lujittuminen voi kestää 1 - 3 vuotta  $+15...+20^{\circ}\text{C}$  lämpötilassa riippuen potsolaanireaktioiden runsaudesta. Hitaat reaktiot tapahtuvat vielä jäljellä olevien  $\text{Ca}^{++}$ -ionien ja savimineraalien, silikaattien ja aluminaattien kesken. Siten maan lopullinen lujittuminen riippuu osaksi myös savimineraalien määrästä ja reaktiokyvystä.

Ioninvaihtoreaktioiden ja potsolaanireaktioiden lisäksi tapahtuu kalkin poltolle vastakkainen reaktio  $\text{CaO}$ :n ja hiilidioksidin välillä. Karbonatisoitumista tapahtuu siellä, missä kalkki pääsee ilman hiilidioksidin kanssa yhteyteen. Jos stabiloidun kerroksen tiivistys tehdään 1 - 2 vrk:n sisällä, tapahtuu karbonatisoitumista vain lujitetun maan pintaosissa. Karbonatisoituminen hidastaa potsolaanireaktioita.

Kalkin leikkauslujuutta lisäävä vaikutus ilmenee lähinnä koheesion kasvuna. Hyvin plastisissa maalajeissa kasvaa myös sisäinen kitkakulma.

Kalkkimäärä, joka riittää parantamaan maalajin ominaisuuksia, ei vielä riitä parantamaan routivuusominaisuuksia. Silttimaissa nopeiden reaktioiden



den tapahduttua routanousu voi olla jopa suurempi kuin luonnollisen maan routanousu.

Alle 4 %:n sideainepitoisuuksilla kalkilla on lähinnä maanrakennusmekaanisia ominaisuuksia parantava vaikutus. Routivuuden vähentämiseksi ja lujuuden lisäämiseksi tulee kalkkipitoisuuden olla yli 4 %. Viikon kuluttua stabiloinnista tulee stabiloidun kerroksen kantavuuden olla tällöin vähintään 75 MPa. Yksittäisarvon tulee olla vähintään 60 MPa.

Routastabiilisuuden saavuttamiseksi hienojakoisen maa-aineksen lujuusvaatimus on pienempi kuin karkearakeisen aineksen. Kalkilla lujitetun kerroksen roudankestävyys riippuu oleellisesti sitoutumisajasta, sitoutumisajan tulisi olla vähintään 2 - 3 kk ennen kuin kerros jäätyy. Riittävän lujuuden aikaansaamiseksi kalkkia tarvitaan tapauksesta riippuen 4 - 12 %.

Eräillä silttimaalajeilla voi lujuus kalkkimäärän kasvaessa pienentyä ja routtiminen jopa lisääntyä. Näissä maalajeissa on vähän kalkin kanssa reagoivia hiukkasia. Käyttämättä jääneet kalkkihiukkaset lisäävät hienoaineksen määrää ja näin pienentävät lujuutta.

Kalkilla lujitettu perusmaa

- estää hienojen aineksien tunkeutumisen ylös rakennekerrokseen
- muodostaa kantavan kuljetustien rakennusaikana
- tekee mahdolliseksi myös alempien kerrosten tehokkaan tiivistämisen
- voidaan käyttää vähäliikenteisten teiden jakavan ja kantavan kerroksen lujittamiseen.

Kalkkiliete alentaa yleensä leikkauslujuutta poltettuun, jauhemaiseen kalkkiin verrattuna, mutta vaikutus saattaa eräissä maalajeissa olla myös päinvastainen. Kalkkiliete saattaa edesauttaa sekoittumista ja voi täten lisätä leikkauslujuutta (Geomekaniikka II 1990).

Kalkin ja sementin seosta käytettäessä ovat saavutetut lujuudet pelkällä kalkilla tai sementillä lujitetun maan lujuuksien välissä seossuhteesta riippuen.

Tärkeimpiä lujuuteen vaikuttavia tekijöitä kalkkistabiloinnissa ovat:

1. Vesipitoisuus
2. Kalkkipitoisuus
3. Kuivairtoteiheys
4. Materiaalin hienoainespitoisuus
5. Humuspitoisuus ja rikki
6. Lämpötila
7. Aika

1. Liika vesi heikentää stabiloitavan maa-aineksen työstettävyyttä ja tiivistettävyyttä. Sekoittuminen ja tiivistys jää huonoksi, jolloin ei saavuteta haluttuja lujuuksia.

2. Optimipitoisuuteen asti kalkin määrän lisäys nostaa lujuutta ja parantaa maanrakennusteknisiä ominaisuuksia. Optimipitoisuuden ylittyessä ei

saada lisää lujuuden kasvua vaan lujuus voi pienetä kalkkimäärän kasvaessa. Tällöin kalkki ei pysty reagoimaan maa-aineksen kanssa, vaan kalkkia jää yli, jolloin maa-aineksen hienoainespitoisuus kasvaa ja lujuus heikenee.

3. Heikosti tiivistetyssä stabiloidussa kerroksessa kalkki pääsee reagoimaan ilman hiilidioksidin kanssa muodostaen karbonaatteja, jolloin lujuuskehitys hidastuu.
4. Hienoaineksen määrän tulee olla riittävä, jotta kalkkistabilointi onnistuu. Hienoainespitoisuuden läpäisyprosentti tulisi olla 0,074 mm kohdalla mieluiten yli 35 %.
5. Humuksen suhteen kalkki ei ole niin arka kuin sementti, koska kalkki sisältää runsaammin  $\text{Ca}^{++}$ -ioneja. Humuspitoisuus ei saisi kuitenkaan olla yli 10 % saven kuivatilavuuspainosta mitattuna. Maan rikkipitoisuus heikentää oleellisesti lujittumista, mikäli rikkipitoisuus (kokonaisrikki) ylittää 0,3 %. Jos rikkipitoisuus on  $\leq 0,03$  %, ei merkittävää lujuuden pienenemistä tapahdu (Rakentajain kalenteri 1989, osa 1).
6. Lämpötilan merkitys lujuuden kehittymiselle poltettua kalkkia käytettäessä ei ole niin suuri kuin sementtiä käytettäessä, koska poltetun kalkin reaktioissa vapautuu lämpöä. Kuitenkin kalkin reaktionopeus kasvaa lämpötilan lisääntyessä (kuten sementilläkin), jolloin lujuuskehitys nopeutuu.
7. Ajan kuluessa potsolaanireaktioiden yhteismäärä kasvaa, jolloin myös lujuus lisääntyy.

### 3.3.2 Stabiloinnin suunnittelu ja kerrospaksuuden mitoitus

Kalkkistabiloinnin suunnittelussa voidaan soveltuvien osien käyttää sementtistabiloinnin suunnittelun runkoa.

#### 1) Suunnittelu ja mitoitusprosessi yleisesti

Yleensä ottaen kalkkistabiloinnin suunnittelu vastaa sementtistabiloinnin suunnittelua.

Maakalkkikerroksen mitoittamisen lähtökohtana on tavoitekantavuus kuten sementtistabiloinnissa. Kerroksen paksuus ja kalkkimäärä määritetään tavoitekantavuuden ja vedenkestävyyden perusteella.

Stabilointityömenetelmän valinnassa pätevät samat kriteerit kuin sementtistabiloinnissa.

#### 2) Kohteessa tehtävät tutkimukset

Tehdään kuten sementtistabiloinnissa.

### 3) Materiaalitutkimukset

Tehdään kuten sementtistabiloinnissa. Taulukossa 9 on esitetty ennakkokokeet, joilla tutkitaan kalkin käytön mahdollisuudet maalajien ominaisuuksien parantamiseksi tai maalajin lujittamiseksi.

Taulukko 9: Ennakkokokeet kalkkistabiloinnissa.

Laboratoriokokeet		Maarak.teknisten ominaisuuksien parantaminen		Kalkilla lujittaminen	
Tutkimuskohde	Tutkimusmenetelmä	2, 3 ja 4% kalkkia	ikä pv	6, 8 ja 10% kalkkia	ikä pv
Rakeisuus	pesuseulonta areometri	X (X)	< 1	X (X)	< 1
Vesipitoisuuden määrittäminen	karbidometri uunikuivatus	(X) (X)	< 1	(X) X	< 1
Tiivistysominaisuuksien muutos	parannettu proctor	X	< 1	X	< 1
Humuspitoisuus	polttomenet. NaOH- „			(X)	< 1 ja 14
Puristuslujuus	yksinkert. puristuskoe kuivasäilytys			X	14 ja 60
Vedenkestävyys	yksinkert. puristuskoe märäsäilytys			X	14 ja 60

Luonnollisen maa-aineksen rakeisuus, vesipitoisuus, kuivatilavuuspaino ja optimivesipitoisuus määritetään mahdollisimman pian näytteenoton jälkeen. Muiden kokeiden kohdalla sarakkeen "ikä" luvut tarkoittavat kalkin lisäyksestä kulunutta aikaa tai koelieriön ikää (pv) sinä päivänä, jolloin kyseinen koe on suoritettava. Sulkeissa olevat kokeet suoritetaan vain, mikäli siihen katsotaan olevan aihetta.

### 4) Stabiloitavan massan suunnittelu

#### Laboratoriokokeet

Laboratoriokokeilla selvitetään, onko maalajin ominaisuuksien parantaminen kalkilla tarkoituksenmukaista. Yleensä tutkimuksessa käytetään sammutettua kalkkia, jotta vesipitoisuus voitaisiin määrittää mahdollisimman tarkasti koekappaleiden tekemistä varten.

Jos tutkitaan maarakennusteknisten ominaisuuksien parantumista kalkilla, voidaan tutkimus suorittaa käyttäen noin 2, 3 ja 4 %:n kalkkimääriä.

Mikäli kysymys on varsinaisesta lujittamisesta, tutkitaan pitkäaikaisten reaktioiden vaikutus koekappaleiden lujuuteen sekä vedenkestävyyteen. Koekappaleet valmistetaan optimikosteudessa olevasta maakalkkiseoksissa, joissa kalkkipitoisuus on 6, 8 ja 10 %. Lujitukseen on sopivin se kalkkiprosentti, jolla saadaan suurin vedenkestävyys. Vedenkestävyydellä tarkoitetaan vedessä säilytettyjen koekappaleiden lujuuden suhdetta ilmassa säilytettyjen koekappaleiden lujuuteen.



Kutakin kalkkipitoisuutta kohti valmistetaan 4 kpl koelieriöitä. Kaksi vuorokautta ennen puristamista otetaan 2 kpl kutakin kalkkipitoisuutta edustavaa lieriötä ja sijoitetaan ne yhden vuorokauden ajaksi 1 cm:n syvyiseen veteen. Koekappaleiden puristamista edeltäväksi vuorokaudeksi ne upotetaan kokonaan veteen. Muut samanaikaisesti puristettavat lieriöt säilytetään koko ajan yli 90 % suhteellisessa kosteudessa. Ilmassa säilytetyissä ja vedessä säilytetyistä koelieriöistä puolet puristetaan 14 vrk:n ikäisinä ja loput 2 kk:n ikäisinä.

### 5) Kerrospaksuuden mitoitus

Kerrospaksuuden mitoitus voidaan suorittaa kalkkistabiloinnissa vastaavalla tavalla kuin sementtistabiloinnissa (vrt. kuva 30).

### 3.3.3 Stabilointityön toteutus

Stabilointityön toteutus tehdään soveltuvien osien kuten sementtistabiloinnissa.

Pehmeän maan leikkauksissa voidaan tiepohjan kuivattamiseksi ja kantavuuden palauttamiseksi levittää paineilman avulla tai käsin poltettua kalkkia 1 - 2 %. Kalkin levitys tulee tehdä yksi vuorokausi ennen varsinaista stabilointia.

Stabiloinnissa tarvittava kalkin määrä ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) voidaan laskea maa-aineksen maksimikuivatilavuuspainon perusteella seuraavasti:

$$K_a = h * k * \gamma_d \quad (6)$$

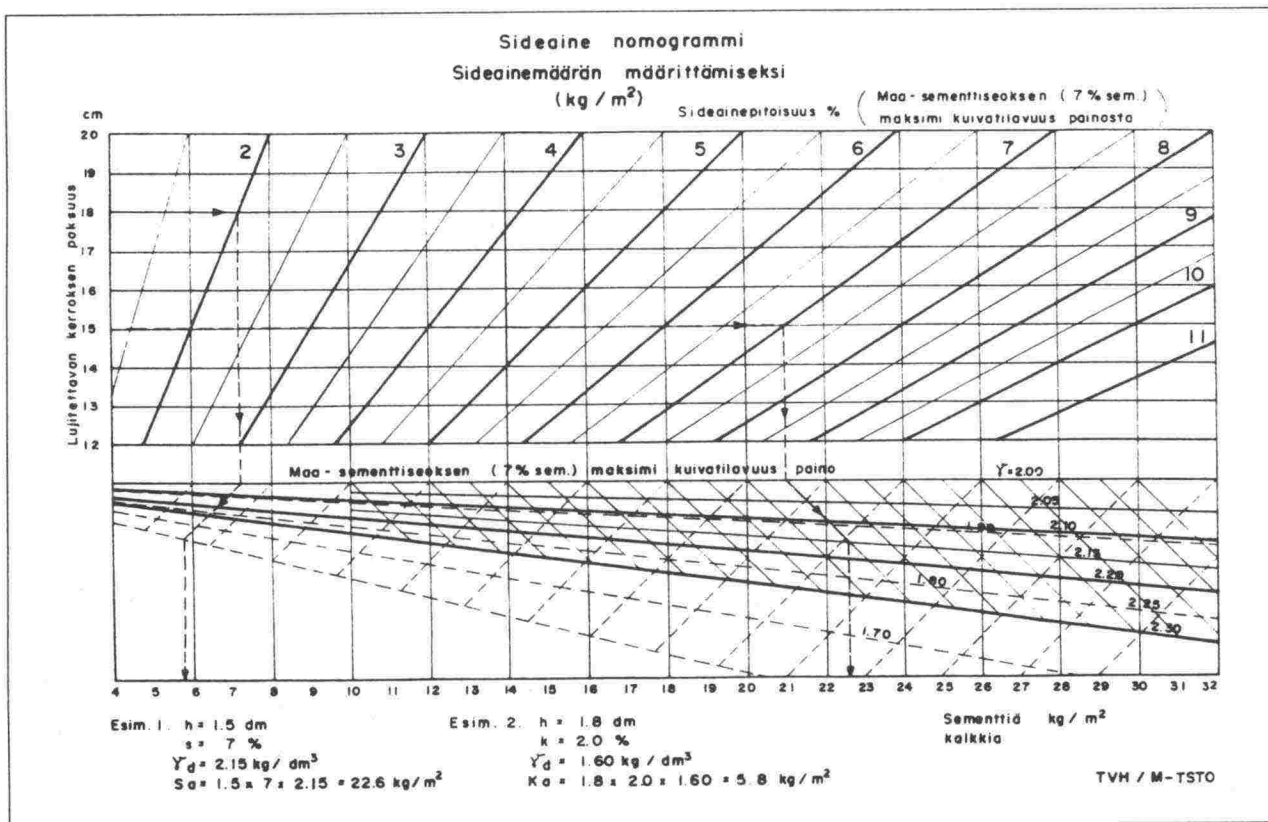
$K_a$  kalkkia ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )

$h$  lujitettavan maakerroksen paksuus (dm)

$\gamma_d$  maa-aineksen maksimitilavuuspaino ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ )

$k$  kalkkiprosenttiyksikkö (%).

Poltettua kalkkia (CaO) käytettäessä sideainemäärä on kerrottava 0,76. Kalkkimäärä voidaan myös määrittää alla olevasta nomogrammista (kuva 42) käyttämällä maasegmenttiseoksen kuivatilavuuspainon paikalla pelkkää maa-aineksen maksimikuivatilavuuspainoa.



Kuva 42: Sideainenomogrammi sideainemäärän määrittämiseksi  
(Stabilointiohjeet 1973).

Mikäli massa on vielä kalkin lisäyksen jälkeen liian kosteata, voidaan uudelleenmöyhennyksellä saada vesipitoisuus alenemaan. Sopiva jyrsintäsyvyys on noin 4 - 6 cm yli vaadittavan lujitetun kerrospaksuuden.

Tiivistäminen tulee suorittaa suhteellisen pian kalkin sekoituksen jälkeen. Löyhässä tilassa maakalkki pääsee karbonatisoitumaan. Lisäksi tiivistämisen tarvittava tiivistysenergia lisääntyy huomattavasti, kun sekoittamisesta on kulunut 1 - 2 vrk.

Kalkilla lujitetun kerroksen päällä voidaan liikennöidä niin pian kuin se kestää murtumatta ajoneuvon painon. Liikenne ei aiheuta sanottavasti vaurioita lujitettuun kerrokseen, sillä se on pitkään hyvin kimmoisin.

### 3.3.4 Valvonta

Valvonta kalkkistabiloinnissa tehdään soveltuvin osin kuten sementtistabiloinnissa.

Käytettävän kalkin tulee olla mahdollisimman puhdasta ja hienojakoista. Sen läpäisyprosentti 0,074 mm kohdalla tulee olla vähintään 60 %.

Erityistä huomiota kiinnitetään sideaine- ja vesipitoisuuden sekä tiiviiden tarkkailuun. Tarkistetaan täyttääkö lujitettu tieosa alusrakenteelle asetetut yleiset vaatimukset. Aikaisintaan viikon kuluttua tutkitaan kantavuutta levykuormituskokeella tai pudotuspainolaitteella. Alusrakenteen päältä mi-

tattuna keskiarvona tulee kantavuuden olla vähintään 75 MPa. Yksittäisarvon tulee olla vähintään 60 MPa. Mikäli maapohjan kantavuus ei täytä edellämainittuja kantavuuksia, ei lujitettua kerrosta voida lukea päällysrakenteen osaksi.

Työvuoroittain tulee pitää päiväkirjaa stabiloinnin suorittamisesta. Kirjassa esitetään mm. raaka-aineen käyttö, työsaavutus, sää, tehdyt kokeet, keskeytykset, käytetyt laitteet ja koneet sekä niiden käyttö. Valvonnassa tulee käyttää tarkkailulomaketta.

Ennen tiivistystä sallitaan kalkkistabiloinnissa vesipitoisuudelle hieman suuremmat toleranssit kuin sementtistabiloinnissa. Tiivistys voidaan aloittaa, kun vesipitoisuus on  $\pm 3\%$ :n tarkkuudella optimivesipitoisuudessa. Liian suurta vesipitoisuutta voidaan stabilointityön yhteydessä pienentää jatkamalla sekoitusta, kunnes vesipitoisuus on haluttu.

Vesipitoisuuden jatkuvassa tarkkailussa voidaan käyttää karbidometriä, jonka lukema verrataan aika ajoin uunikuivatuksella saatuihin arvoihin. Poltettua kalkkia käytettäessä saa käyttää vain uunikuivausta vesipitoisuuden määrittämiseen.

Tiivistystarkkailu suoritetaan vertaamalla maakalkin kuivatilavuuspainoa Proctor-kokeesta määritettyyn kuivatilavuuspainoon. Ensimmäisen työvuoron aikana tehdään 10 tiivistyskoetta, sen jälkeen 2 kpl jokaista alkavaa 2000 m<sup>2</sup> lujitettua pinta-alamäärää kohti. Tiivistysasteen keskiarvovaatimukset on esitetty taulukossa 10.

Taulukko 10: Penkereiden ja leikkauspohjan tiiviysastevaatimukset.  
(Laadunvalvontaohjeet TIEL 732816).

Tiiviysasteiden keskiarvon vähimmäisvaatimukset penkereelle ja alusrakenteen yläpinnalle. Yksittäinen tiiviysaste saa alittaa vaatimusrajan enintään 5 %-yksikköä. (Suluissa oleva mitta koskee tapausta, jolloin päällysrakenne tehdään aikaisintaan vuoden kuluttua pengertämisestä).

Rakenne	Syvyys tien pinnasta m	Pienin sallittu keskim. tiiviysaste %			
		Pengermassojen tai leikkauspohjan kantavuusluokka			
		B	C ja D	E	F ja G
Penger:					
-Päällysrakenteet 1-4	< 2	95	95	92	-
	2,0-5,0 (3,0)	90	90	87	-
	> 5,0 (3,0)	-	-	-	-
-Päällysrakenteet 5-6	< 3,0	90	90	87	-
	> 3,0	-	-	-	-
Leikkauspohja:					
- Päällysrak. 1-6		95	95	92	-
Maalaatikon pohja:					
-Päällysrak. 1-6		90	90	87	-



### 3.4 Bitumistabilointi

Tielaitoksen bitumistabilointia käsittelevä ohjeistus on uusittavana. Uudet bitumistabilointiohjeet ja niihin liittyvät laatuvaatimukset ja työselitykset tullevat käyttöön vuoden 1994 aikana.

Uudet ohjeet tulevat tarkentamaan tässä esitettyä tietoutta. Moreeneja stabiloitaessa tulee pitää mielessä, että moreenin hienoaines voi vaihdella luonteeltaan huomattavasti eri moreeniesiintymien välillä. Tällöin ohjeiden yksiviivainen noudattaminen ilman riittäviä ennakkokokeita voi tuottaa epämiellyttäviä yllätyksiä.

#### 3.4.1 Bitumistabiloinnin perusteet

Bitumistabiloinnilla tarkoitetaan tien rakentamisessa ja kunnossapidossa käytettävää menetelmää, jolla parannetaan tien kestävyyttä sitomalla tien rakennemateriaaleja bitumisilla sideaineilla.

Menetelmänä voi olla paikallasekoitus tien päällä tai asemasekoitus. Sideaineina käytetään kuumaa vaahdotettua bitumia tai bitumiemulsiota. Edellisessä tapauksessa puhutaan vaahtobitumistabiloinnista (VBST) ja jälkimmäisessä bitumiemulsiostabiloinnista (BEST).

Bitumistabiloinnissa sideaine lisätään kylmään kiviainekseen. Kiviaines voi olla joko vanhaa tierungossa jo olevaa materiaalia tai uutta paikalle ajettua materiaalia tai näiden yhdistelmä.

Bitumistabilointia voidaan käyttää joko jakavan kerroksen alla tai jakavaan tai kantavaan kerrokseen. Jakavan kerroksen alla ei stabiloidun kerroksen täyttää kantavuutta saada useinkaan täysin käytettyä hyväksi, koska kerroksen tiivistyminen jää vajaaksi heikosta alustasta johtuen. Kuitenkin kappilaarinen veden nousu saadaan katkaistua tehokkaasti.

Bitumistabiloinnilla saadaan aikaan kantavuuden lisääntymistä ja routivuuden vähenemistä. Routimisen väheneminen johtuu hienoaineksen sitoutumisesta bitumiin. Vedenpitävänä materiaalina bitumi lisää myös tierungon vedenläpäisyvastusta, minkä vuoksi tierunkoon ei pääse ylhäältä päin vettä niin paljon kuin rakennettaessa rakenne sitomattomalla materiaalilla.

Mobil Oil'n kehittämässä vaahdotusmenetelmässä nestemäistä vettä sekoitetaan kuumaan bitumiin ylipaineessa ja sen annetaan purkautua alempaan paineeseen. Bitumin ja veden lämpö määrä on niin suuri, että se saa veden nopeasti höyrystymään, jolloin bitumi vaahtoutuu (Mobil Oil Corporation 1971). Patentti on nyttemmin vanhentunut, joten kilpailijoita on odotettavissa markkinoille.

Bitumien vaahtoutumista kuvataan tilavuuden laajenemiskertoimella ja puoliutumisaajalla. Tilavuuden laajenemiskerroin on vaahdon tilavuuden suhde alkuperäisen bitumin määrään. Vaahdon puoliutumisaika on aika, mikä kuluu vaahdon maksimitilavuuden puolittumiseen.

Bitumissa olevien vesipisaroiden koko vaikuttaa höyrystymisnopeuteen eli siihen nopeuteen, millä vaahtoa syntyy bitumin ja veden tullessa ulos sekoituskammioista (Mobil Oil Corporation, 1971). Vaahdotuslaitteen tehoa

voidaan tarvittaessa parantaa esisekoituslaitteella, jolla voidaan hajottaa vesipisaroita pienemmäksi ennen vaahdotusta.

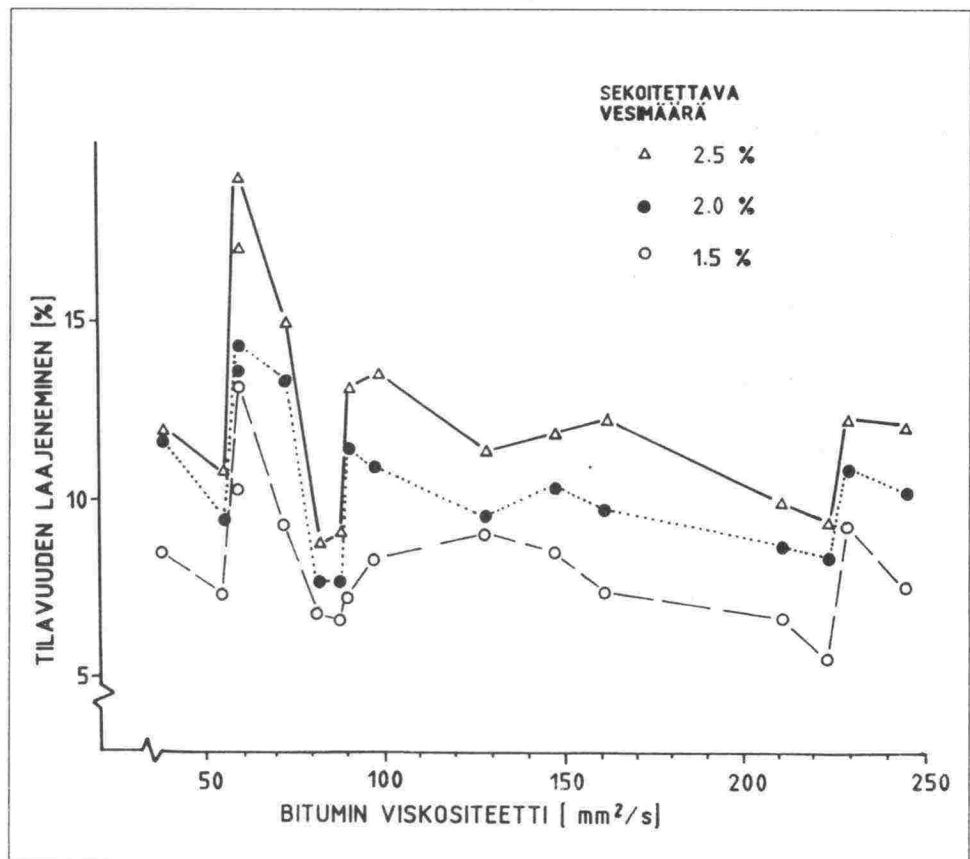
Yleensä vaahdotuslämpötilan tai vesimäärän nostaminen lisää vaahtoutumista, mutta lyhentää puoliutumisaikaa (Fraco & Shofsfall 1981). Bitumiin sekoitettava vesimäärä on 1 - 2 painoprosenttia bitumimäärästä. Tällöin saadaan 8 - 15-kertainen vaahtoutuminen. Kun bitumin virtausta pidetään vakiona, vesimäärää muuttamalla saadaan säädeltyä syntyvän vaahdon laatu (Lee 1981).

Vaahdotukseen suositellaan 8 - 15-kertaista vaahdotusta ja 25 s puoliutumisaikaa (Äijö 1985).

Bitumin sisältäessä silikonaa vaahtoaminen tapahtuu huonosti, jos ollenkaan. Sama vaikutus on, jos bitumin lämpötila on alle +150 °C (Abel & Hines 1979).

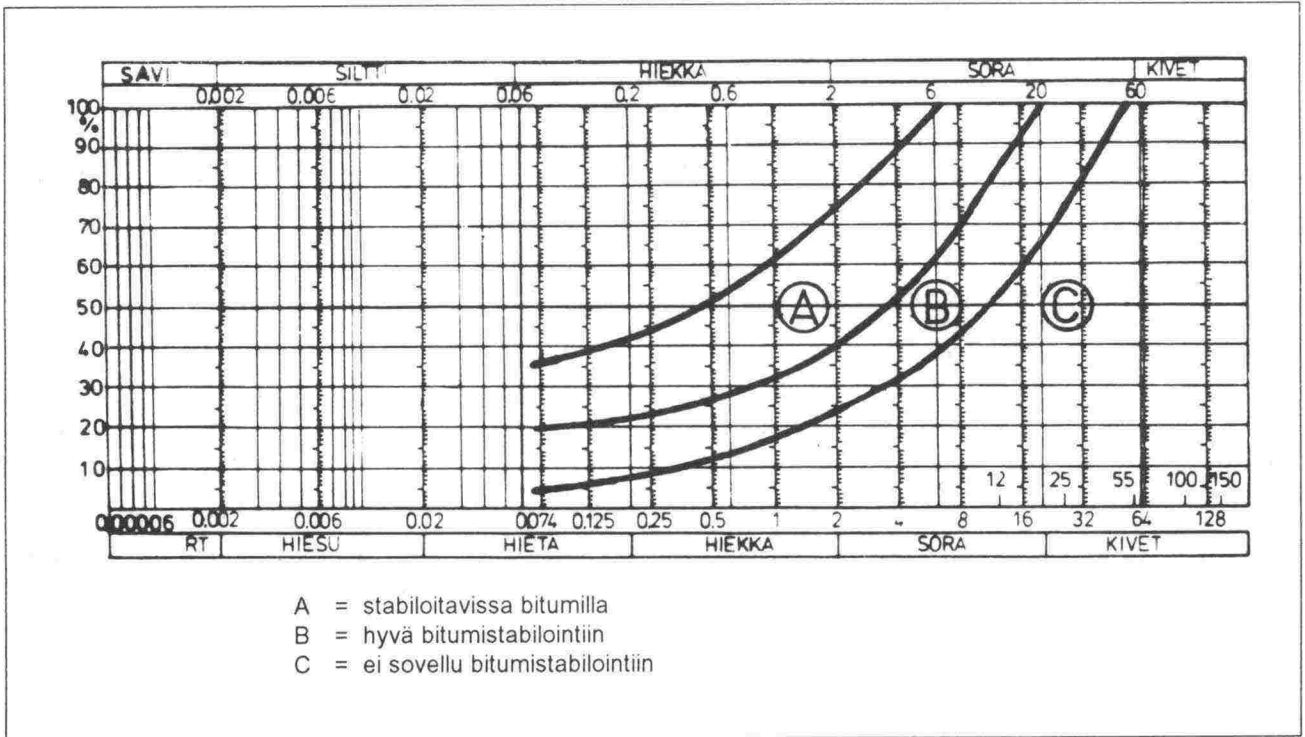
Bitumin viskositeetti ei vaikuta vaahtoutumiseen lineaarisesti vaan hypäyksittäin (kuva 43). Kuvan perusteella maksimilaajeneminen saadaan viskositeetillä 60 - 75 mm<sup>2</sup>/s. Minimilaajeneminen on viskositeetillä 80 - 90 mm<sup>2</sup>/s.

Viskositeetin vaikutus massan jäykkyyteen ei ole kovin suuri, mikä ilmeisesti johtuu stabiloidun kerroksen avoimesta rakenteesta ja karkeasta aineksesta.



Kuva 43: Bitumin viskositeetin vaikutus vaahtoutumiseen (Äijö 1985).

Mobil Oil suosittaa kuvan 44 mukaisia ohjealueita vaahtobitumilla stabiloitaville kiviaineksille. Alue A:n kiviaines soveltuu bitumistabilointiin, alue B:n aines soveltuu hyvin bitumistabilointiin ja alue C:n materiaaliin tulee lisätä hienoaainesta.



Kuva 44: Suositus bitumistabiloinnissa käytettävälle kiviainekselle (Akeroyd & Hicks 1988).

Bitumiemulsio valmistetaan sekoittamalla bitumia pieninä pisaroina veteen. Lisäaineena tarvitaan pieni määrä emulgaattoria, joka pitää bitumihiukkaset erossa toisistaan ennen emulsion levittämistä tielle. Tartuketta ei tarvita. Emulsion murtuessa eli veden erottuessa ja valuessa pois jäljelle jäävä bitumi tarttuu hyvin ja kovettuu nopeasti. Emulsiot voidaan jakaa murtumisnopeuden perusteella nopeasti, keskinopeasti ja hitaasti murtuviin. Nopeasti murtuvaa ja keskinopeasti murtuvaa voitaneen käyttää stabiloinnissa. Hitaasti murtuvan käyttö on kyseenalaista, sillä mahdollinen lisähidastus saadaan aikaan stabilointiaineella. Toisaalta emulsion liian nopean murtumisen seurauksena on maapartikkelien huono peitto ja sen seurauksena huono stabiliteetti ja pysyvyys.

Emulsioiden käsittelyssä on varottava ennen aikaista murtumista mm. pumppauksen ja mahdollisen lämmityksen yhteydessä. Kahden emulsio-lajin yhdistäminen ei onnistu, vaan seos murtuu. Kylmänä vuodenaikana emulsio on suojattava pakkaselta, sillä veden jäätyessä emulsio turmeltuu käyttökelvottomaksi. Emulsiotyöt onnistuvat parhaiten yli +10 °C lämpötilassa.



Tärkeimpiä bitumistabiloinnin lujuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat:

1. Massan vesipitoisuus
2. Bitumipitoisuus ja bitumilaatu
3. Massan kuivairtoteiheys
4. Materiaalin hienoainespitoisuus ja rakeisuus
5. Materiaalin humuspitoisuus
6. Kiviaineksen laatu
7. Tartukkeet.

1. Massan vesipitoisuus vaikuttaa stabiloinnin onnistumiseen siten, että vesipitoisuuden ollessa suuri, tiivistäminen on vaikeampaa, huokostila jää suureksi ja rakeiden kosketuskohtien pinta-ala pieneksi. Toisaalta myös liian kuivassa massassa jää tiivistyminen vaillinaiseksi, koska vähäbitumisisä massoissa myös vesi toimii bitumin ohella voiteluaineena tiivistyksessä. Lisäksi liian vähäinen vesimäärä voi aiheuttaa emulsion liian nopean murtumisen.

Stabiloitavan materiaalin sopivalla kastelulla noin 80 %:iin Proctor-optimivesipitoisuudesta vesi erottaa hienot partikkelit muodostaen kanavia, joita pitkin bitumi pääsee tunkeutumaan partikkeleiden ympärille. Liikaa kas-  
teltaessa kiviaines puuroutuu ja kosteus estää tarttumista, jolloin bitumihiukkaset pyrkivät poistumaan liikaveden mukana rakenteesta. Stabiloinnissa tämä ilmenee bitumin nousuna stabiloitavan kerroksen pintaan tiivistyksen aikana (Ylinampa & Vesa 1990).

Vaahdotukseen ja emulsion tekoon käytettävän veden tulee olla puhdasta, ettei heikennetä bitumin tarttuvuutta kiviainekseen. Vesi ei saa sisältää huumusta. Myös liika emäksisyys tai happamuus voi heikentää tartuntaa.

2. Bitumipitoisuuden lisäämisellä optimipitoisuuteen saakka voidaan lisätä huokosissa olevan sideaineen määrää ja tätä kautta kiviaineksen välistä tartuntoja. Rakenteesta tulee suljetumpi ja siten kestävämpi ja kantavampi. Optimipitoisuuden ylittyessä bitumi alkaa toimia voiteluaineen tavoin rakeiden välissä eikä näin lisää enää lujuutta.

Bitumipitoisuuden lisääminen pienentää stabiloidun rakenteen vedenläpäisevyyttä ja lisää vedenkestävyyttä.

Bitumin tunkeuman vaikutuksesta vaahtobitumiasfaltin lujuuteen ei ole yksiselitteistä tietoa (Äijö 1985).

3. Kuten sementtistabiloidussa rakenteessa, tiivistyksellä on suuri merkitys myös bitumistabiloidussa rakenteessa. Mitä tiiviimmäksi rakenne saadaan, sitä lujempi ja kantavampi se on.

4. Liian suuresta hienoainespitoisuudesta seuraa se, ettei bitumia riitä peittämään kunnolla kiviainesta, johtuen hienoaineksen suuresta ominaispinta-alasta. Rakenne jää liian avoimeksi eikä haluttuun lujuuteen päästä.

Mobil Oil'n mukaan hyväksyttävälle vaahtobitumistabiloinnille tulisi 0,075 mm läpäisseen aineksen määrä olla vähintään 5 % ja alle 20 %, kun aines ei ole savea. Saven haittavaikutuksia voidaan kompensoida lisäämällä noin 1 % sammutettua kalkkia (Akeroyd & Hicks 1988).

Vaahdotettu bitumi muodostaa sekoitettavan materiaalin hienoaineksen (< 6 mm) kanssa mastiksin, johon suuremmat rakeet tarttuvat tiivistyksen aikana (Ylinampa & Vesa 1990).

5. Humus vaikuttaa haitallisesti bitumistabiloinnissa sitomalla bitumia itseensä ja heikentämällä bitumin tarttumista.

6. Kiviaineksen laatu vaikuttaa siten, että huokoiseen kiviainekseen bitumin tarttuminen on lujempaa, mutta bitumin menekki on suurempi.

Kiviaineksen pölyisyys heikentää tartuntaa. Pölyisyyden haittavaikutuksia voidaan vähentää kastelemalla ja/tai murskaamalla kiviaines.

Kiviaineksen happamuus vaikuttaa jonkin verran bitumin ja kiviaineksen tarttumiseen. Käytännössä tällä ei ole suurta merkitystä. Kiviaineksen happamuus vaikuttaa myös emulgointiaineen ja kiviaineksen yhteensopivuuteen. Emulsio murtuu jo sekoituksessa, jos sekoitettavat ainekset eivät sovi yhteen (Lehtipuu 1983).

7. Vaahdotbitumin yhteydessä käytetään tartukkeita varmistamaan bitumin tarttumista kiviainekseen. Korkeita lämpötiloja käytettäessä on varmistettava, ettei tartuke menetä tehoaan.

Tartukkeista yleisimmin käytettyjä ovat alkyyliamiinit. Emulgoitumista vastaan kestävimpiä ovat monoamiinit ja huonoimpia polyamiinit. Kuumuuden kestävyyydessä järjestys on päinvastainen (Lehtipuu 1983).

Tartukkeiden tehoa tuhoaa ilman sisältämä happi ja hiilidioksidi. Näin ol-  
len tartukkeiden sekoitus sideaineeseen on järjestettävä siten, että ilma ei pääse kiertoprosessiin mukaan.

Alentaessaan sideaineen ja kiviaineksen välistä pintajännitystä, tartuke samalla alentaa sideaineen ja veden välistä rajapintajännitystä. Tällöin voi sideaine osittain emulgoitua esim. syyssateiden aikana. Tämän välttämisen asettaa ylärajan tartukkeen määrälle.

Toisaalta tartukkeen käytöstä ei ole osoitettu olevan varsinaista hyötyä stabiloinnin onnistumisen kannalta (Akeroyd, henkilökohtainen tiedonanto, 14.4.1992).

### 3.4.2 Bitumistabiloinnin suunnittelu ja kerrospaksuuden mitoitus

#### 1) Suunnittelu ja mitoitusprosessi

Bitumistabiloinnin suunnittelussa voidaan noudattaa seuraavanlaista työprosessia:

- tutkitaan stabilointia eräänä rakennevaihtoehtona tien rakentamisessa /kunnostuksessa

\* voidaanko stabilointi yleensäkin tehdä?

\* onko taloudellisesti kannattava?

- suunnitellaan stabiloitava kerros
  - \* valitaan sideaine (vaahtobitumi/bitumiemulsio)
  - \* suunnitellaan stabiloitava massa
  - \* määritetään stabiloitavan kerroksen paksuus perustuen alustan kantavuuteen ja kuormituskertalukuun
- valitaan työmenetelmä
  - \* paikallasekoitus/asemasekoitus.

Stabilointia suunniteltaessa selvitetään käytettävissä olevan materiaalin sopivuus bitumistabilointiin kiviaineksen rakeisuuden ja humuspitoisuuden perusteella. Suoritetaan kustannusvertailut eri vaihtoehtojen kesken huomioimalla sekä rakennuskustannukset että käyttökustannukset.

Stabilointikohteet voidaan luokitella eri vaatimustasoihin käyttökohteiden mukaan. Luokkia voidaan asettaa esimerkiksi kolme seuraavan jaon mukaisesti. Korkein luokka koskee teitä, joilla suoritetaan perusparannusta tai uudisrakennusta ja joilla tasaisuusvaatimukset ovat päätieverkon luokkaa (Leinonen, M.). Tällaisilla teillä ei tulisi sallia vanhojen materiaalien käyttöä eikä niistä johtuvia laatuvaihteluita. Vahvistettavan kerroksen tulee olla paikalle ajettua tarkoin kontrolloitua kiviainesta, jonka rakeisuus ja lujuusominaisuudet tunnetaan. Ainoastaan näin voidaan taata korkeat vaatimukset täyttävä lopputulos.

Toinen luokka on vaatimustasoltaan nykyistä öljysora- ja soratiestöä vastaava. Näillä teillä vaatimukset ovat yleensä alhaisemmat, jolloin on mahdollista käyttää paikallista materiaalia joko sellaisenaan tai pienellä määrällä uutta kiviainesta parannettuna. Saavutettava kestävyys paraneminen on kuitenkin huomattava (Leinonen, M).

Kolmas ryhmä on nykyiset soratiet, joiden rungon kantavuus on riittävä, mutta erityisesti roudan sulamisen aikainen pinnan pehmeneminen on ongelmana. Tällöin stabiloinnilla pyritään pinta saamaan vettä läpäisemättömäksi ja kantavuusvaihtelut pienemmiksi. Kerros voidaan vahvistaa siten, ettei erillistä kulutuskerrosta välttämättä tarvitse tai sellaisena voi olla sirotepinta. Jos stabiloitu kerros jätetään sellaisenaan kulutuskerrokseksi, on sideainemäärää lisättävä 1 - 2 prosenttiyksikköä (Leinonen, M). Ruotsalaiset kokemukset em. menettelystä eivät ole rohkaisevia, vaan pinta on reikiintynyt varsin nopeasti. Ruotsalaisten johtopäätös kokeiluista on, että stabiloitu tie on päällystettävä varsin pian öljysoralla tai vastaavalla kulutuskerroksella (Jacobson).

Stabiloitavan kerroksen suunnittelun lähtökohtana on rakenteelle tuleva kuormitus ja alusrakenteen kantavuus. Bitumirakenteen tulee olla mahdollisimman luja, mutta samalla joustava. Käytännössä joudutaan valitsemaan lujuuden ja joustavuuden välillä, koska joustavuuden kasvaessa lujuus heikkenee ja päinvastoin. Stabiloidun rakenteen joustavuus on tärke-



ää erityisesti routaongelmista kärsivillä tai heikoilla pohjilla olevilla teillä. Tällöin rakenteen liiallisesta lujuudesta on itse asiassa vain haittaa.

## 2) Kohteessa tehtävät tutkimukset

Tehdään soveltuvien osin kuten sementtistabiloinnissa. Mikäli suunnitellaan paikalla stabiointia, on erityisesti selvitettävä stabiloitavaksi tarkoitettun kerroksen paksuuden riittävyys (sekoitusvyvyys) ja materiaalin vaihtelevuus.

## 3) Kiviainestutkimukset ja sideaineen valinta

Kiviainestutkimukset tehdään kuten sementtistabiloinnissa.

Stabiointiin käytettävän bitumilajin valinta tulee perustua stabiointityöhön, soveltuvuuteen ja olosuhdetekijöihin, missä valmisrakenne toimii.

Sideaineina ovat olleet vaahdotustekniikassa kovimpana laatuna B80 ja pehmeimpänä B800, kaikkia kovuusluokkia näiden välillä on myös kokeiltu. Sideaine on sisältänyt tartuketta tarttuvuuden takaamiseksi kylmään, kosteaan kiviainekseen. Eniten käytetyt laadut ovat kovuusluokaltaan B200 - B300. Emulsiotekniikassa on käytetty bitumiemulsio BIE K-1:tä. Kokeissa havaittiin kovimmat bitumit vaikeimmiksi vaahdottaa eikä niillä saatu mitään etua pehmeämpiin laatuihin nähden. Emulsion ja käytettyjen kuumien bitumien välillä ei ole lopputuloksessa havaittu käytännön eroja (Leinonen, M.).

Stabiointitavasta riippuen valitun bitumilajin tulee soveltua hyvin joko vaahdotukseen tai emulgointiin. Eri olosuhdetekijät vaikuttavat bitumilajin valintaan seuraavasti:

Taulukko 11: Olosuhdetekijöiden vaikutus bitumilajin valintaa.

Olosuhdetekijät	Suositeltava bitumilaji	
	Kova	Pehmeä
Alustan kantavuus	kantava	heikko, routiva
Liikenne	vilkas	vähän (kovettumisvara)
Lämpötila	lauha ilmanala	kylmä ilmanala

Emulsion ja vaahdotetun bitumin tarttuvuus kiviainekseen eroaa siten, että emulsiot peittävät enemmän suuria rakeita ohuella kalvolla kuin vaahdotuksen bitumi. Tämä on ehkä syynä emulsioasfaltin hieman heikompaan lujuuteen kuin vaahdotbitumiasfaltin (Mobil Oil Australia LTD 1973).

## 4) Stabiloitavan massan suunnittelu

Massan bitumipitoisuus määritetään stabiloitavalta kerrokselta vaaditun kantavuuden perusteella, huomioiden humuksen ja ylimääräisen hienoainekseen bitumipitoisuutta lisäävä vaikutus. Jos stabiroidaan bitumia sisältäviä materiaaleja, voidaan bitumipitoisuutta vähentää.

Vaahtobitumin bitumipitoisuus riippuu hienoaineksen määrästä. Ohjeena Englannissa on annettu käytettäväksi bitumipitoisuudeksi 3,5 %, kun 0,074 seulan läpäisyprosentti on 5 % ja 5,0 %, kun 0,0074 seulan läpäisyprosentti on 20 % (Akeroyd & Hicks 1988).

Ennakkokokeita tulee tehdä, erityisesti moreeneja stabiloitaessa, niin paljon, että voidaan olla varmoja sekoituksen antavan halutun lopputuloksen. Moreenien hienoaines vaihtelee luonteeltaan niin voimakkaasti eri moreeniesiintymien välillä, ettei pelkkä hienoaineksen määrään pohjautuva massan suunnittelu anna takeita stabiloinnin onnistumisesta. Valitettavasti ei ole olemassa yhtenäistä käytäntöä stabiloitujen koekappaleiden valmistuksesta, säilytyksestä ja koestamisesta, joten käytännössä on pyritty sovelta-  
maan asfalttien koestamisessa käytettyjä menettelyjä. Kuivana säilytetyt ja koestetut koekappaleet antavat epärealistisia tuloksia. Tämä pätee erityisesti hienoainesrikkaissa materiaaleissa johtuen voimakkaasta koheesiosta. Koekappaleet tulisiikin koestaa kosteina, esimerkiksi kuivasäilytyksen jälkeen koekappaleita tulisi pitää vedessä.

Myös koestuslämpötilalla on selvä vaikutus tuloksiin johtuen bitumin ominaisuuksien lämpötilariippuvuudesta.

Optimibitumipitoisuuden määrittämiseen voidaan käyttää mm. seuraavia testimenetelmiä:

- Marshall-lujuus ja kokoonpuristuma, ASTM D 1559
- Hveem-lujuus ja kokoonpuristuma, ASTM D 1560
- jäähdytys-sulatus-testi, ASTM D 244
- koheesiotesti, ASTM D 1075
- kimmokertoimen (moduulin) määrittäminen
- kosteuden kesto "Immersion-Compression Test".

Nämä koemenetelmät eivät anna kuitenkaan välttämättä kovin hyviä ominaisuuksia kuvaavia tuloksia. Parempia tuloksia saataisiin ehkä jonkinlaisella dynaamisella kuormituskokeella ja lievennetyllä kosteudenkestokokeella.

Koekappaleiden vedenkestävyyttä voidaan tutkia ASTM:n mukaisella Marshall-koekappaleille soveltuvilla koemenetelmällä (ASTM 1973).

Juha Äijön tekemissä tutkimuksissa (1985) koemassat eivät kestäneet vedenkestokokeen 24 tunnin liuotusta +50 °C lämpöisessä vedessä, vaan kaikki koekappaleet hajosivat altaaseen.

Kun tutkitaan halkaisuvetolujuutta ASTM:n mukaisella menetelmällä (ASTM-D-1074-83), puristuksessa ei käytetä välilevyjä. Neste Oy:n tutkimuslaboratorion kokemusten mukaan haurailla massoilla välilevyt uppoavat koekappaleeseen halkaisematta sitä.

Koekappaleet voidaan valmistaa Marshall-sullonnalla. Koekappaleiden jälkihoitona kappale suositellaan säilytettäväksi muotteineen 24 tuntia +60 °C lämpökaapissa, minkä jälkeen muotit poistetaan varovasti hydraulipuristimella. Tämän jälkeen koekappaleita säilytetään vielä lämpökaapissa (+60 °C) kaksi vuorokautta ennen kokeiden suoritusta.



Kappaleiden irtotiheys voidaan määrittää tie 412 menetelmällä.

Peittoaste voidaan määrittää ASTM-standardimenetelmän D2459-67 mukaan käyttämällä 6 mm:n seulaa 9,5 mm:n seulan sijasta, koska on oletettavaa, ettei vaahdotettu bitumi peitä suuria rakeita.

### 5) Kerrospaksuuden mitoitus

Mitoitus- ja mittausten menetelmien tulee pohjautua käytännön tilanteeseen ja tien rakenteelliseen mitoitukseen. Niiden tulisi ottaa huomioon dynaaminen kuorma, jolla on lyhyt kuormitusaika ja joka aiheuttaa jännityksiä sekä pohjamaan pintaan että sidotun rakenteen alapintaan. Edelliset aiheuttavat tierakenteen deformaatiota, painumista, jälkimmäiset taas päällysteen väsymistä (Leinonen, M.).

Stabiloitujen rakenteiden mitoitus, niin kuin tierakenteiden yleensäkin, tulee lähteä pohjamaan kantavuudesta. Pohjamaan suurinta sallittua jännitystä, minkä se kestää painumatta, ei tule ylittää. Mitoituksen lähtöarvoina käytetään kerrosten kimmomoduuleja, kerrospaksuuksia ja Poisson-vakioita. Poissonin luku on kerroksen kokoonpuristuvuuden suhteellinen mitayksikkö.

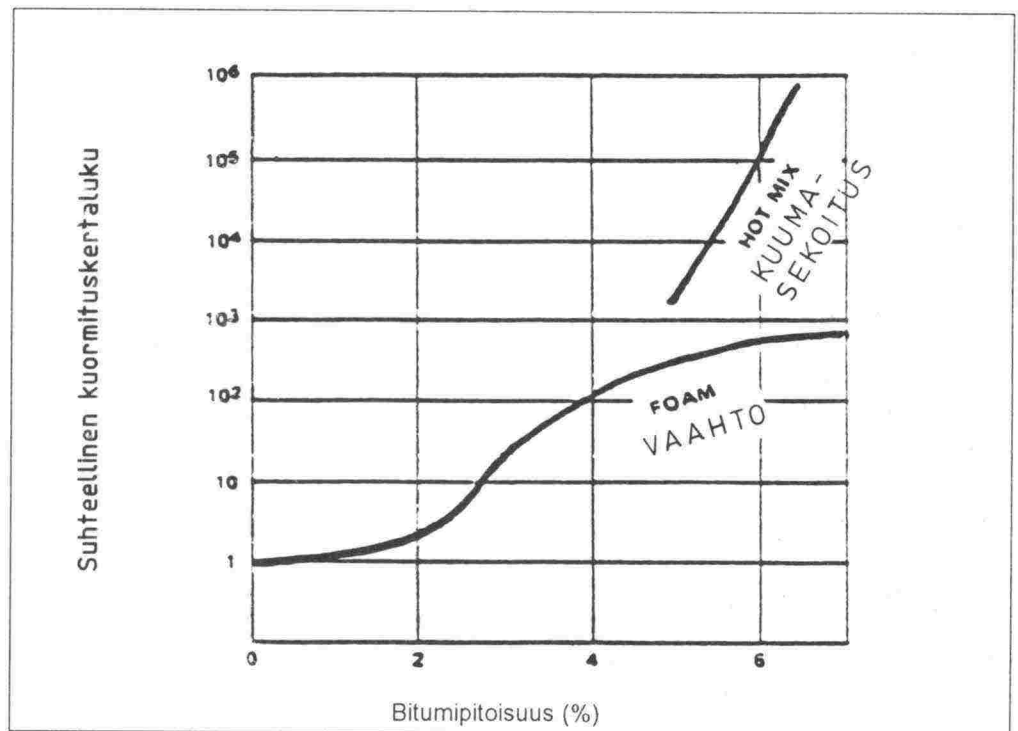
Kaikilla materiaaleilla on taipumuksena menettää toimintakykynsä tietyn ajan tai tiettyjen käyttökertojen jälkeen. Tierakenteella puhutaan väsymisilmiöistä, joka tapahtuu kuormitusten taivuttaessa toistuvasti tierunkoa. Sidotuissa kerroksissa syntyy väsymishalkeilua, kun kuormitusten aiheuttama vetorasitus ylittää rakenteen kestämän suurimman vetojännityksen, mikä maksimiraja on iän ja jatkuvan kuormituksen myötä laskenut.

Sitomattomissa kerroksissa väsymisilmiö näkyy materiaalin hienontumisena. Sitomaton kerros alkaa sen johdosta tiivistyä raideurien kohdalta, hieno materiaali alkaa absorboida enemmän vettä kerrokseen. Rakenne tulee vähitellen routivaksi (Leinonen, M.).

Asfalttipäällysteitä mitoitettaessa tulee sidottujen kerrosten väsyminen ottaa tarkkaan huomioon. Toistaiseksi Suomessa on tämä voitu jättää ottamatta huomioon, koska se on sisään rakennettu nykyiseen mitoitusohjeistoon.

Kuvassa 45 on esitetty erään VBST-kerroksen väsymiskäyrä sideainepitoisuuden funktiona. Kuvan perusteella ko. kiviaineksella sideainepitoisuuden kasvu 2,5 %:sta 4,0 %:iin on lisännyt kerroksen väsymiskestävyyttä 10-kertaiseksi ja sitomattomaan verrattuna on saatu 100-kertainen väsymiskestävyys. Jo tämä yksi esimerkki riittää selventämään mitoituksen tärkeyttä. Pienellä lisäinvestoinnilla voidaan rakenteelle saada huomattavasti lisäkestävyyttä (Leinonen, M.).



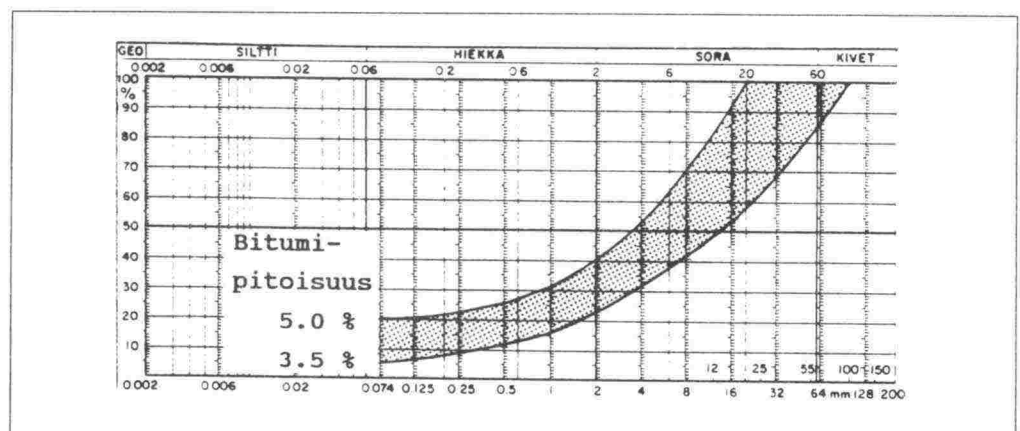


Kuva 45: Bitumipitoisuuden vaikutus kantavan kerroksen väsymisominaisuuksiin (Leinonen, M).

Bitumistabiloidun kerroksen mitoituksessa voidaan käyttää soveltuvien osin Neste Oy:n toimeksiannosta Oulun yliopiston tie- ja liikennetekniikan laboratorion laatimaa "Bitumilla sidottujen rakenteiden mitoitusohjetta".

Mitoitusohje perustuu kriittisiin jännityksiin ja muodonmuutoksiin sekä sallittuihin kuormiin. Mitoituksessa käytetään päällys- ja alusrakenteen materiaaleille dynaamisia kimmomoduleita (E-moduleita).

Parannettavassa rakenteessa  $E_{\text{STAB}}$ -moduuliksi voidaan valita  $2000 \text{ MN/m}^2$ , jos kiviaineksen rakeisuuskäyrä on kuvassa 46 esitetyllä ohjealueella hyvin suhteistuneena. Lisäksi työ tulee tehdä hyvissä olosuhteissa hyviä työtapoja noudattaen, varsinkin tiivistyksen osalta.



Kuva 46: Hyvin vaahtobitumistabilointiin soveltuvan materiaalin rakeisuusalue (Ylinampa & Vesa 1990).

Bitumisorakerroksen kantavuuteen vaikuttaa valmiiseen kerrokseen jäänyt tyhjätilan suuruus. Vaahtobitumistabiloinnissa on ehdotettu, ettei massan tyhjätila saisi olla yli 12 %. Jos tyhjätilavaatimus täyttyy, voidaan kantavuutena ( $E_{\text{STAB}}$ -moduulina) käyttää  $2000 \text{ MN/m}^2$ , muussa tapauksessa  $1000 \text{ MN/m}^2$  (Ylinampa & Vesa 1990). Toisaalta riittävä tyhjätila mahdollistaa stabiloinnissa käytetyn veden haihtumisen ja bitumin lujittumisen. Tyhjätilaa arvioitaessa tulee muistaa, että kyseessä ei ole asfalttimassa.

Yhdellä kertaa tehtävän bitumisorakerroksen paksuutta rajoittaa laitteisto-kohtaisen maksimisekoitusvyödyden lisäksi kerroksen tiivistettävyyden. Vaahtobitumikerroksen paksuudeksi Englannissa suositellaan 150 - 300 mm riippuen liikenteen määrästä (Akeroyd & Hicks 1988). Maksimisekoitusvyödyys määräytyy myös sen mukaan, kuinka paksu sekoitettava kerros on. Tämä tarkoittaa, että sekoitettavaa, tasalaatuista (ei isoja kiviä) materiaalia on riittävän paksusti.

### 3.4.3 Bitumistabilointityön toteutus

Bitumistabilointi voidaan tehdä joko paikallasekoitusmenetelmällä tai asemasekoitusmenetelmällä.

Stabilointityömenetelmä valitaan stabilointikohteen perusteella. Jos saatava materiaali on jo valmiina paikalla, käytetään paikallasekoitusta. Asemasekoitusta käytetään, kun vaaditaan hyvää lujuutta ja kun materiaalin kuljetuskustannukset ovat sellaiset, että asemasekoitus on edullisempi kuin paikallasekoitus.

Bitumistabiloinnin toteutuksessa pätevät melko pitkälle samat säännöt kuin sementtistabiloinnissa. Muutosta menetelmiin aiheutuu nestemäisestä sideaineesta, bitumista.

#### 1) Paikallasekoitusmenetelmä

Bitumistabiloinnin paikallasekoitusmenetelmä vastaa sementtistabiloinnissa käytettävää liikkuvaa asemasekoitusmenetelmää. Erona on erilainen sideaine. Bitumistabiloinnissa ei tarvita jälkihoitoa.

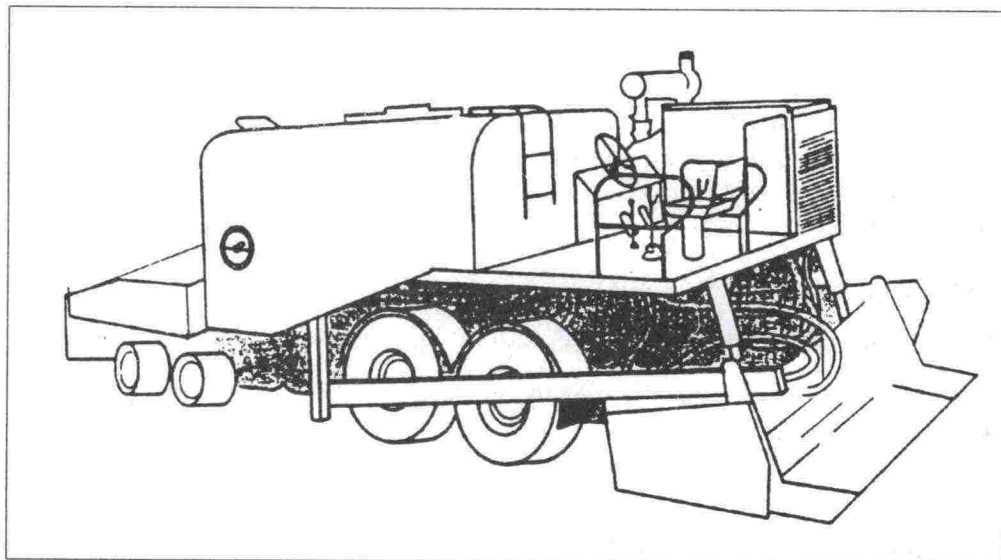
Suomessa kokeiltuja paikallasekoituslaitteita ovat:

- Caterpillar RR-250 (katso sementtistab. kuva 35)
- Midland Mixpaver (kuva 47)
- Bomag MBH (kuva 48)
- Neste Oy:n kehittämä sekoituslaite.

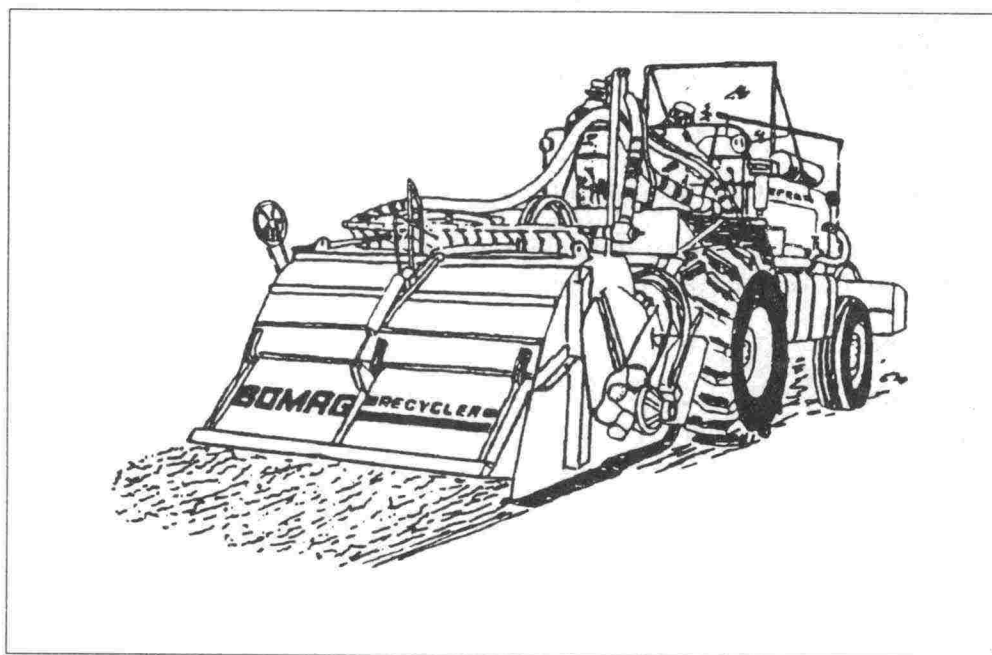
Midland Mixpaverissa on jatkuvatoiminen kaksiakselinen pakkosekoittaja (kuva 47). Laitteessa kiviaines kuormataan laitteen etuosaan, josta se syötetään sekoittajaan. Sekoitin purkaa massan tielle asfalttilevittimen tapaan. Mixpaver esitiivistää levitettävän massan, joten levitysjälki on erittäin hyvä. Mixpaverin bitumitankki on  $7 \text{ m}^3$  ja maksimiväleveys 3 m. Mixpaveria voidaan käyttää sekä vaahtobitumi- että emulsiobitumiasfaltin valmistukseen. Mixpaveria käytetään muissa maissa eniten emulsiomassan tekemiseen.

seen. Vaahtobitumimassaa valmistettaessa massaa valmistuu noin 100 t/h. Tiivistettäessä levitetty kerros ( $250 \text{ kg/m}^2$ ) levenee 20 - 30 cm.

Stabilointijyrsimessä Bomag MBH 100 on erillinen jyrsinyksikkö, johon sideaine syötetään ja joka sekoittaa materiaalit (kuva 48). Työleveys on 2 m ja jyrsintäsyvyyttä voidaan säätää 0 - 30 cm. Tien poikkileikkaus muotoillaan erikseen tiehöylällä.



Kuva 47: Midland mixpaver (Bitumistabilointi-raportti 1983).



Kuva 48: Bomag MBH 100 (Bitumistabilointi-raportti 1983).



Paikallasekoitteen bitumistabiloinnin työvaiheet ovat seuraavan luettelon mukaiset (Ylinampa & Vesa 1990):

#### Etukäteistutkimukset

Kohdan 3.4.2 mukaisesti

#### Mittaukset

Suunnitelman maastoon merkitseminen

#### Maakivien poisto

Yli 100 mm:n raekoko on jo haitallinen. Poisto joko jyrsimällä ne rakenteesta ylös ja työntämällä väliaikaisesti ojaan tai murskaamalla kivet takaisin rakenteeseen. Jyrsintä tulee tehdä vähintään samaan syvyyteen kuin lopullinen stabilointijyrsintä.

#### Tien oikaisu

Suurimmat painumat ja epätasaisuudet on poistettava.

Tie tulee saada täsmälleen oikeaan muotoonsa, sillä muuten stabiloidusta kerroksesta ei saada tasapaksua.

#### Murskeen tai muun kiviaineksen lisäys

Määrä ja rakeisuus etukäteistutkimusten perusteella. Lisäykseen ei kannata käyttää hyviä murskeita ts. on harkittava, olisiko hyvälaatuisella murskeella parempia käyttökohteita tai riittääkö toimenpiteeksi pelkkä murskeen lisäys.

Lisämursketta tai muuta kiviainesta käytetään lähtökiviaineksen rakeisuuden parantamiseksi ja tien tasaisuuden korjaamiseksi. Bitumistabilointi edellyttää, että stabiloitavassa materiaalissa on riittävästi hienoainesta.

#### Tasaushöyläys

Pinnan profiloiminen mahdollisimman lopulliseen muotoonsa ja tasoonsa.

Materiaalin levitys sekä pinnan lopullinen taseus tulee tapahtua muutamalla höyläyskerralla, jotta kiviaines ei lajittuisi.

#### Tiivistäminen

Stabiloitava materiaali tiivistyy homogeeniseksi patjaksi, jolla on sama tiiviyys niin reuna-alueella kuin keskialueilla. Poistettujen maakivien reiät tulevat tiiviiksi.

Tie tiivistetään kumipyöräjäyrällä parilla ylityskerralla, erityisesti reunojen tiiviyteen on kiinnitettävä huomiota. Tien pettäessä työkonien alla stabiloidun kerroksen paksuus vaihtelee ja lisäksi tie levenee.

#### Kastelu

Vähintään 80 %:iin optimikosteudesta, mutta se ei saa olla liian suuri hienoaineksen paakkuuntumisen välttämiseksi.

Kuivalla säällä massa kuivuu jo sekoituksen aikana niin paljon, että kiviaines täytyy kastella 1 - 3 prosenttiyksikköä kosteammaksi ilman lämpötilasta riippuen.

### Stabilointi

Joko vaahtobitumi- tai emulsiotekniikalla.

Tie stabiloidaan kaista kerrallaan, jotta työ häiritsisi liikennettä mahdollisimman vähän. Kapeilla (alle 7 m) ja hiljaisilla teillä voidaan VBST tehdä kolmella sekoituskerralla. Tällöin kaksipuolisella kallistuksella keskittien stabilointipaksuus kasvaa ja bitumipitoisuus pienenee. Tästä ei liene kuitenkaan suurempaa haittaa lopputuloksen kannalta, sillä tien reunat ovat ratkaisevia tien keston kannalta.

Materiaalin sopiva kosteus on hyvin tärkeä sekä bitumin sekoittumisen että massan tiivistämisen kannalta. Liian pieni kosteus ei hajota kiviainesta tarpeeksi, mutta toisaalta liian suuri kosteus voi aiheuttaa runsaan hienoaineksen paakkuuntumisen.

Oulun piirissä tehdyssä vaahtobitumikokeilussa havaittiin, että jos kiviaines oli liian kuivaa, irtosi pinnasta normaalia enemmän kiviä. Yleensä kivien irtoaminen loppui kolmen vuorokauden kuluttua. Jos päällysteen pinta sai kuivua hitaasti, pilvisen sään tai varjopaikan ansiosta, oli pinnan irtoaminen vähäisempää kuin auringon ja tuulen nopeasti kuivattamissa kohdissa.

Jos stabiloitu kerros työaikana häiriintyy esim. kovista sateista johtuen, voidaan kerros jättää tiivistämättä odottamaan kuivumista ja sään paranevista. Kerros voidaan työstää uudelleen jopa vielä 1 - 2 päivän kuluttua sideaineen sekoittamisesta ilman että tarvitaan sideainelisäystä (Akeroyd & Hicks 1988).

Jyrsimen sekoitusaika tulee pitää riittävänä käyttämällä pientä ajo- nopeutta.

Hyvin sekoittunut massa on homogeenisen näköistä. Itse bitumia on vain hienoainekseen sitoutuneena ja isommat rakeet ovat paljaita. Vaahtobitumistabiloinnissa tuore massa on saman väristä kuin kiviaineksin. Jos suutin on tukossa, jää sille kohtaa hiukan vaaleampia juonteita. Karkeassa materiaalissa väri on tummempi kuin runsaasti hienoja aineksia sisältävässä. Tien pinta muuttuu kuivumisen myötä tummaksi.

Vaahtobitumistabiloinnissa kiviaineksen ollessa kylmää, bitumi jäähtyy sekoitusvaiheessa ja vaahtoaminen vähenee liian nopeasti. Tämän seurauksena massassa näkyy erillisiä bitumipisaraita.

Stabilointi on tehtävä lämpimään aikaan (esim.  $> +5^{\circ}\text{C}$ ), ainakin kiviaineksen lämpötilan tulee olla yli nollan. Vaahdon muodostuminen heikkenee huomattavasti lämpötilan laskiessa eikä peittoastetta saada riittäväksi. Bitumiemulsiolla on emulsioveden jäätyminen vaarana. Myöskään stabiloidun rakenteen ei olisi hyvä jäätyä ennen sen kuivumista, jotta jää ei rikkoiisi jo syntyneitä sidoksia. Asemasekoitteisella massalla ei tällaista rajoitetta välttämättä ole, vaan stabiloitava kiviaines voidaan vaikka lievästi lämmitellä.

Tartuke saattaa menettää ominaisuutensa korkeassa lämpötilassa, joten bitumia ei saa lämmittää liian kuumaksi. Kiviaineksen lämpötilan tulee olla yli +5 °C.

### Kumipyöräjäyräys

Alkutiivistyksessä käytetään kumipyöräjäyrää (0 - 8 ylityskertaa). Kumipyöräjäyrän rengaspaine tulee olla 6 - 8 kg/m<sup>3</sup> ja pyöräpaineen 4,0 - 4,5 t. Jyräysnopeus tulee olla noin 3 km/h.

### Höyläys

Tien pinnan lopullinen profilointi sekä pituus- että poikittaissuuntaisesti koko kaistalle samanaikaisesti.

Höylättäessä ei tien reunaan saa muodostua palletta, joka estää sadeveden virtaamisen sivuojaan. Emäterän päässä oleva kohtisuora stoppariterä, joka lasketaan tarvittaessa alas, on osoittautunut hyväksi apuvälineeksi. Samalla se estää kiviaineksen lajittumista höyläyksen yhteydessä.

Höyläys voi johtaa siihen, että eräisiin kohtiin tulee ohuempi vahvistettu kerros, esimerkiksi tien reunaosuudelle. Suunnitelmat tulee tehdä niin, että tällaisissa ohuimmissakin kerroksissa paksuus on riittävä. Tämä on otettava huomioon ennen jyrsimistä tapahtuvassa tien muotoilussa. Se tulee tehdä mahdollisimman hyvin. Jälkihöyläämisen tarve vähenee siten oleellisesti eikä tarvitse mitoitaa ylimääraistä höyläamisvaraa. Näin voidaan taata tien pituus- ja poikittaisprofiilin tasaisuus.

Rakentamisen aikana bitumistabiloitua kerrosta voidaan viimeistellä höyläämällä vielä stabiloinnin jälkeenkin. Tällöin pinta saadaan sekä pituus- että poikkiprofiililtaan juuri haluttuun tasoon ja muotoon. Jälkimuotoilu on tärkeä työvaihe riittävän tasaisuuden ja ajomukavuuden saamiseksi.

Pinnan tasaus tulee tehdä siten, että erillistä tasausta ennen tien päällystämistä ei tarvita.

### Täryjäyräys

Tällä jyräyksellä saadaan lopullinen pinta tiiviiksi ja pölyämättömäksi, samalla tiivistetään höyläyksessä irronnut materiaali. Täryjäyrän valssin paino tulee olla yli 6 t, iskunpituus 0,4 - 0,9 mm ja taajuus 30 - 50 Hz. Jyräysnopeus tulee olla noin 3 km/h.

Kerroksen tiivistys tulee tehdä niin hyvin, ettei raskas liikenne aiheuta tien urautumista. Tasaisuusmittaukset tehdään 5 m:n oikolaudalla. Suurin sallittu epätasaisuus on 20 mm. Tien sivukaltevuuden tulee olla suunnitelmiin mukainen.

Stabiloitu tie on valmis pohja lopulliselle päällysteelle, esim. SIP, ÖS, BS, KAB tai AB. Ennen lopullista kulutuskerrosta stabiloitu kerros on hyvä väliaikainen päällyste, joka kestää purkaantumatta kohtalaista liikennettä suotuisissa sääolosuhteissa.



### Lopullinen kulutuskerros

Tulee tehdä aikaisintaan kahden viikon kuluttua, jotta stabiloitu kerros ehtii kuivua, mutta kuitenkin samana päällystyskautena.

Tarvittaessa tie harjataan puhtaaksi, jolloin tuleva päällyste tarttuu bitumistabiloituun kerrokseen hyvin ja kestää paremmin.

Eri variaatioita tekniikassa on. Lopullinen työvaiheiden jakaminen ja tekniikka on riippuvainen käytettävistä materiaaleista ja laitteistosta ja lopullisen rakenteen vaatimuksista.

### Työsaumat

Poikittaisissa työsaumoissa sekoitusjyrsintä aloitetaan jo aikaisemmin stabiloidulta osuudelta. Pitkittäisissä saumakohdissa seuraava ajokerta ulotetaan 10 - 15 cm aikaisemmin stabiloidulle puolelle.

Pintaa tasattaessa bitumitonta kiviainesta ei saa kulkeutua stabiloidulle osuudelle. Työsaumat tulee tehdä siten, että pinta on kiinteä ja täyttää taksaisuusvaatimukset.

Saumojen limityskohdissa on vältettävä liiallista (kaksinkertaista) bitumimäärää.

Paikallastabiloinnissa kapasiteetti on työvuorossa n. 5000 - 7000 m<sup>2</sup>:ä, mikä riippuu tosin paikallisista olosuhteista. Stabiloinnin eteneminen päivässä on noin 1 km.

Stabiloidusta pinnasta ei irtoa kiviä, jolloin mm. ajoneuvojen vahingoittuminen työn aikana vähenee. Pöly-, melu- ja värinähaittoja ei esiinny työn aikana siinä määrin kuin perinteisillä menetelmillä rakennettaessa. Pinta voidaan pitää liikenteen alla ennen lopullisen kulutuskerroksen tekemistä. Pinta pysyy tasaisena eikä pyri lammikoitumaan. Rakennustyömaalla voidaan siksi pitää hieman suurempaa nopeusrajoitusta kuin perinteisillä menetelmillä rakennettaessa. Kiinteä pinta kestää purkautumatta muutamia viikkoja. Purkautumat voidaan paikata öljysoralla.

Päällysteen lujuus lisääntyy veden poistuessa rakennekerroksesta tiivistyksen aikana ja sen jälkeen. Lopullisen lujuuden saavuttaminen vie kahdesta viikosta kuuteen kuukauteen (Corwin 1984).

Paikallasekoitusmenetelmän etuja ovat paikallaolevien materiaalien (uusio) käyttö ja helppo siirrettävyys.

Huonona puolena voidaan pitää sitä, ettei saada niin hyvää sekoittumista kuin asemasekoituksessa.

## **2) Asemasekoitus**

Asemasekoitteinen bitumistabiloitu kerros voidaan rakentaa kuten öljysorapinta. Stabilointimassan valmistukseen sopii hyvin öljysoran valmistuksessa käytettävät laitteistot.

Ennen sekoittamista kiviaines kastellaan lähelle optimikosteuttaan. Sopiva sekoitusaika lienee 30 - 60 sekuntia.

Menetelmän etuna on useiden lajikkeiden helppo sekoittaminen ja homogeeninen massa. Lisäksi voidaan käyttää jo olemassa olevia öljysoran valmistuksessa käytettäviä laitteistoja.

Menetelmän haittana on sen kalleus paikallasekoitukseen verrattuna.

### 3.4.4 Valvonta (Ylinampa & Vesa 1990)

#### Materiaalinäytteet

Kiviaineksesta tutkitaan vesipitoisuus ennen stabilointia. Troxleria käytettäessä on huomattava, että kerroksessa mahdollisesti oleva bitumi vaikuttaa tuloksiin.

Massanäytteitä otetaan yksi alkavasta 2000 m<sup>2</sup> työmäärästä, kuitenkin vähintään 12 kpl/työmaa. Asemasekoitusmenetelmää käytettäessä näytteet otetaan asemalla, paikallasekoitusmenetelmää käytettäessä ennen tiivistämistä stabilointijyrsimen keskikohdalta. Massanäytteistä tutkitaan bitumi- ja vesipitoisuus sekä rakeisuus.

Työmaalle tuodusta bitumista otetaan yksi näyte, josta tehdään normaalit bitumin laatututkimukset.

#### Bitumipitoisuus

Massanäytteen bitumipitoisuus saa poiketa ohjearvosta 0,5 prosenttiyksikköä. Työvuorittain käytetyn bitumimäärän on oltava vähintään ohjearvon edellyttämän määrän suuruinen.

#### Kerroksen paksuus

Vaahtobitumikerroksen paksuus mitataan koekuopista lopputiivistyksen jälkeen. Paksuus saa poiketa ohjearvosta enintään 20 mm. Paksuusmittauksia tehdään yksi alkavaa 2000 m<sup>2</sup> kohti, kuitenkin vähintään 12 kpl/työmaa.

#### Kantavuusmittaukset

Vaahtobitumimassan kuivuminen kestää useita viikkoja. Kerroksen jäykistyminen jatkuu tämänkin jälkeen, sillä bitumin kovettuminen vaatii aikaa vielä enemmän. Lopulliset kantavuusarvot saavutetaan vasta vuoden tai kahden kuluttua.

Mitattavat pisteet tulee olla samat kuin ennakkomittauksissa. Dynaamiset kuormituslaitteet soveltuvat staattisia kuormituslaitteita paremmin bitumilla sidottujen kerrosten tutkimiseen.



### 3.5 Masuunihiekka stabiloinnissa

Masuunihiekka on vesijäähdytettyä masuunikuonaa. Masuunihiekasta käytetään myös nimiä kuonahiekka, granuloitu kuona ja granuli. Masuunihiekka (maHk) voidaan määritellä kuvauksella "hydraulisesti sitoutuva kiviaines". Kuvauksen mukaisesti masuunihiekka sitoutuu ajan myötä muodostaen lopulta lujan sitoutuneen kerroksen. Lisäksi masuunihiekalla on hyvät lämmöneristysominaisuudet, jolloin pelkästään masuunihiekasta tehty kerros toimii myös lämpöeristeenä. Masuunihiekkaa tuotetaan Raahessa ja Koverharissa.

Masuunihiekalle tyypillistä on sitoutumisen hitaus. Lopullinen lujuus kehittyy useiden kuukausien aikana. Sitoutumista ei tapahdu kylmänä vuodenaikana, joten käytännön tilanteissa loppulujuus saavutetaan usein vasta seuraavana vuonna. Toisaalta hitaan sitoutumisen vuoksi kuonahiekkarakenteella on aikaa tiivistyä ennen sitoutumisen alkamista. Lisäksi materiaalilla on pitkän sitoutumisajan myötä itsekorjautumisominaisuus, mikä on etu tienrakennustöissä.

Masuunihiekkaa on sekoitettu olemassa olevaan tiemateriaaliin sellaisenaan, esimurskattuna ja jauhattuna. Ilman muita aineita on sekoituksen lujuuskehitys ollut hyvin hidasta. Sitoutumista on usein nopeutettu käyttämällä aktivaattorina sementtiä tai kalkkia. Sementtistabilointiohjeen (1992) mukaan maabetonia tehtäessä masuunikuonajauheen kanssa on käytettävä portlandsementtiä ja masuunikuonajauhon määrä saa olla korkeintaan 50 % sideaineen määrästä. Kyseinen määräys pyrkii nopeaan alkulujittumiseen eikä selvästikään huomioi masuunikuonan uudelleensitoutumiskykyä.

Ulkomaiset kokemukset materiaalin lujittamisesta jauhetulla masuunihiekalla yhdessä kalkin kanssa ovat myönteisiä ja mielenkiintoisia (Höbeda).

Kotimaisia tutkimuksia masuunihiekan käytöstä stabilointiin on tehty erityisesti Tampereen teknillisen korkeakoulun rakennusgeologian laitoksella. Moreenimurskeilla tehdyissä koesarjoissa on hyvin harvoin päästy 7 vrk:n tavoitelujuuteen, mutta usein jo yhden kuukauden iässä puristuslujuudet ovat olleet 5 - 6 MPa. Sideaineena on ollut jauhattu masuunihiekka hienoudeltaan 220 - 500 m<sup>2</sup>/kg (Blaine). Sideaineen määrä on ollut välillä 2 - 21 % runkoaineen painosta. Yleensä kokeissa käytettiin aktivaattorina eli tehtiin stabilointia aineyhdistelmillä. Toisena ainesosana (aktivaattorina) käytettiin tavallisesti joko kalkkia (CaO tai Ca(OH)<sub>2</sub>) tai yleis- tai portlandsementtiä. Lisäksi kokeita on tehty käyttäen kipsiä, lentotuhkaa ja NaOH yksinään ja kalkin tai sementin yhteydessä (Pylkkänen).

Valkonen on tutkinut moreenin stabilointia masuunihiekalla ja bitumiemulsiolla. Tutkimuksessa käytettiin sekä kationista (pH n. 4) että anionista (pH n. 12) bitumiemulsiota. Suomalaiset tienrakennuskiviainekset ovat tavallisesti happamia, jonka vuoksi Suomessa on käytetty vain kationista bitumiemulsiota. Masuunihiekka on kuitenkin voimakkaasti emäksistä (pH n. 12). Tämä aiheuttaa kationisen emulsion nopean murtumisen, jolloin yhdistelmän käyttö aiheuttaa suuria työteknisii ongelmia eikä sekoitustulos ole homogeeninen. Sen sijaan anioninen bitumiemulsio levittäytyy masuunihiekan rakeiden ympärille tasaisesti, jolloin sekoitustulos on tasa-



laatuinen. Yhdysvalloissa anionisen bitumiemulsion käyttö on yleistä emäksisen kiviainesta stabiloitaessa (Valkonen).

Kokeissa sekoitettiin hienoainespitoisiin moreeneihin masuunihiekkaa eli karkeutettiin moreenia. Runkoainesseoksen sitomiseen käytettiin sekä kationista että anionista bitumiemulsiota. Myös pelkkää moreenia (ilman masuunihiekkaa) stabiloitiin vaahtobitumilla. Moreenien hienoainespitoisuus (0.074 mm läpäisy) vaihteli välillä 30 ... 40 %. Kationisella bitumiemulsiolla stabiloitu moreeni-masuunihiekkaseos antoi noin kaksinkertaisia halkaisuvetolujuuksia verrattuna vaahtobitumilla stabiloituun moreeniin. Anionisen emulsion vaikutus moreeni-masuunihiekka-seoksen lujuuteen oli selvästi pienempi kuin kationisen emulsion. Koekappaleiden tiivistettävyyttä stabiloidulla moreeni-masuunihiekkaseoksella oli huomattavasti parempi kuin stabiloidulla moreenilla. Lisäksi tutkimuksissa havaittiin, että kaikkien koekappaleiden vedenkestävyys parani huomattavasti, kun massaan lisättiin 1 % yllesementtiä runkoaineen painosta (Valkonen).

Kokeiden perusteella voidaan päätellä, että on mahdollista karkeuttaa hienoainespitoinen moreeni sekoittamalla siihen masuunihiekkaa (tai jauhetua masuunihiekkaa) siten, että saavutetaan toivottu hienoainespitoisuus. Sekoitus on vaihtoehto moreenin hienoaineen poistamiselle ja voi tapahtua jo moreenin murskaus/seulontaprosessin yhteydessä. Masuunihiekan hitaasta sitoutumisesta ja uudelleensitoutumiskyvystä johtuen sekoitettu tuote voidaan varastoida kohtuullisen ajan (ainakin useita viikkoja). Käyttökohteessa karkeutettu moreeni voidaan, ja usein on syytäkin, stabiloida esimerkiksi bitumiemulsiolla. Sopivat sekoitussuhteet on aina varmistettava huolellisilla ennakkokokeilla. Moreenin humuksen vaikutus on erityisesti selvitettävä.

### 3.6 Stabilointi aineyhdistelmillä

Useissa tutkimuksissa on todettu, että käyttämällä päästabilaattorin lisänä jotain muuta ainetta tuloksissa on todettu parannuksia verrattuna stabilointiin pelkällä päästabilaattorilla. Yleensä muutokset ovat olleet joko massan parempi käsiteltävyys, stabilointityön parempi lopputulos tai halvemmat kustannukset.

Käytännössä on vaikeaa vetää rajaa, milloin on kyseessä lisäaine ja milloin käytetään eri aineiden yhdistelmää. Tässä tekstissä käytetään ilmaisua aineyhdistelmä, vaikka toisen ainesosan määrä olisi vähäinen silloin, kun kyseessä ei ole selvästä notkistimesta, hidastimesta, kiihdyttimestä tai vastaavasta.

Tyypillisiä aineyhdistelmiä ovat esimerkiksi sementti ja masuunikuonajauho sekä bitumiemulsio ja sementti.

Esimerkiksi Japanissa yleisin kantavan kerroksen paikallastabilointitapa on käyttää bitumiemulsion ja sementin yhdistelmää. Pelkästään emulsiota käyttävää stabilointia ei tehdä ollenkaan (Höbeda).

Käytännössä selkein stabilointiyhdistelmä on pieni määrä hydraulista sideainetta yhdistettynä bitumistabilointiin. Hydraulinen sideaine voi olla sementtiä tai jauhetta/esimurskattua masuunihiekkaa. Myös eräät lentotuhkat, lähinnä kivihiilituhkat, omaavat samoja ominaisuuksia kuin se-

mentti. Bitumistabiloinneista yleisimmät ovat emulsiostabilointi ja vaahtobitumistabilointi. Esimerkiksi kivihiililentotuhka soveltuu Akeroydin mukaan erittäin hyvin vaahtobitumistabiloinnin yhteydessä käytettäväksi (Akeroyd, henkilökohtainen tiedonanto, 14.4.1992). Myös monia muita, lähinnä teollisuuden jäte- tai sivutuotteita on ulkomailla kokeiltu vaihtelevalla menestyksellä.

Koska paikallasekoitusmenetelmässä pienten sideainemäärien sekoittaminen on vaikeaa ja lopputulos usein epähomogeeninen, tulisi tällaisen sekoituksen tapahtua asemasekoituksena. Eräs todennäköinen menettelytapa tulee olemaan hydraulisen sideaineen sekoittaminen moreeniin mekaanisen jalostuksen yhteydessä. Tällöin tuloksena saadaan karkeutettua moreenimateriaalia, joka käytön yhteydessä voidaan haluttaessa stabiloida bitumilla.



## 4 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tienrakennusmateriaalina hyvät soraesiintymät on paikoin jo käytetty loppuun. Lisäksi jäljellä olevien soraesiintymien käyttöä rajoitetaan jo nyt ja tullaan rajoittamaan entistä enemmän ympäristösyiden vuoksi. Kalliomurskeiden käyttökään ei ole ongelmattonta. Em. syyt johtavat sekä korvaavien että paikalla jo olevien vanhojen materiaalien hyväksikäyttöön.

Tienrakentamisessa käyttökelpoista tai käyttökelpoiseksi jalostettavaa moreenia Suomessa on runsaasti. Esiintymät eivät valitettavasti jakaudu tasaisesti maan eri osiin.

Moreenin käytön ongelma on sen yleensä suuri hienoainespitoisuus. Hienoaineksen laadun vaihtelu eri esiintymien välillä vaikeuttaa vakiokäsittelytapojen kehittämistä. Kuitenkin tietyt käsittelyperiaatteet ovat yhteisiä, vain niiden sisällä on tehtävä tapauskohtaista hienosäätöä.

Moreeneja voidaan joissain tapauksissa käyttää sellaisenaan lähinnä pengerrakenteissa, mutta yleensä moreeni joudutaan jalostamaan rakennemateriaaliksi joko mekaanisesti tai kemiallisesti. Myös jalostustapojen yhdistelmät voivat tulla kyseeseen.

Moreenin mekaanisen jalostuksen keinot ovat samat kuin tavallisten materiaalienkin. Ongelmat syntyvät lähinnä moreenin hienoainespitoisuudesta ja siitä johtuvista käsittelyongelmista. Nykyiset ohjeet pyrkivät alentamaan hienoainespitoisuuden niin pieneksi, että lopputuotteen ominaisuudet pysyvät varmasti turvallisella puolella. Tämän haittapuolena on, että hylätään itse asiassa käyttökelpoisia moreeniesiintymiä tai toisaalta tehdään tarpeetonta työtä. Valitettavasti tällä hetkellä ei ole olemassa yleisiä sääntöjä moreenin hienoaineksen luokitteluksi, vaan sopivan hienoainespitoisuuden määrä on selvitettävä tapauskohtaisesti ennakkokokein. Haluttaessa lisätä moreenin käyttöä on tutkimuksin kehitettävä hienoaineksen luokitteluperusteet ja -menetelmät.

Kemiallisen jalostuksen mahdollisuudet ovat moninaiset, mutta käytännön kokeilut ovat keskittyneet sementin ja bitumin käyttöön. Sementin käytöllä on pyritty maabetonimaiseen lopputulokseen, jolloin tuloksena on yleensä jäykkä päällysrakenne. Jäykkä päällysrakenne ei sovi heikoille pohjille. Bitumia käyttäen saadaan jossain määrin sidottu joustava päällysrakenne, joka sopii myös heikommille pohjille.

Moreenin kemiallinen jalostustapa on valittava lopputuotteelta haluttujen ominaisuuksien perusteella. Osa kemiallisen jalostuksen menetelmistä on kehitetty tiettyyn, rajattuun tarkoitukseen, jolloin menetelmän käyttö muihin tarkoituksiin ei välttämättä tuota haluttua lopputulosta. Esimerkiksi vaahtobitumistabilointi on alunperin kehitetty hienoainesrikkaiden materiaalien käsittelymenetelmäksi lähinnä alempiluokkaisilla teillä. Käytettäessä vaahtobitumistabilointia vilkasliikenteisillä teillä vähän hienoainesta sisältävän materiaalin käsittelyyn tulokset eivät välttämättä vastaa odotuksia ja esim. urapainumat ovat mahdollisia.

Käytettäessä paikallasekoitusmenetelmiä tulee pitää mielessä, että pienten ainemäärien sekoittaminen kenttäolosuhteissa on usein vaikeaa ja lopputulos on helposti hyvin epähomogeeninen. Mikäli moreenia halutaan käsi-



tellä pienillä sideainemäärillä, varmin lopputulos saadaan asemasekoituksella. Toinen vaihtoehto on sideaineen sekoittaminen moreeniin mekaanisen jalostuksen yhteydessä.

Moreenin jalostusmahdollisuudet ovat runsaat, mutta varsin vähän käytetty. Hyvien materiaalien ehtyessä ja käyttörajoitusten lisääntyessä sekä kuljetusmatkojen kasvaessa moreenista tulee jalostamisen lisäkustannuksista huolimatta kilpailukykyinen vaihtoehto nykyisille materiaaleille. Materiaali- ja mitoitustietämyksen lisääntyessä moreenirakenteet tulevat yhä useammin olemaan vaihtoehto nykyisille rakenteille.

## 5 KIRJALLISUUSLUETTELO

Abel, F., Hines, C.R., Base stabilization with foamed asphalt. Raport No: CHOH-SHB-R-79 (FHWA-CO-RD-79-5). Colorado Division of Highways, Denver, Colorado 1979.

Akeroyd, F.M.L and Hicks, B.J., Asphalt 88, Highways, January 1988, s. 43 - 45.

Alkio, R., Hienoaineksen vaikutus stabiloidun moreenimurskeen pakkaskestävyyteen. Tielaitoksen selvityksiä 62/1992. TIEL 3200112.

Annala, M., Sementillä stabiloitu moreeni jakavan ja eristyskerroksen korvaajana. Tie- ja liikenne 1974:5.

Bergstrand, S. et al. Betonipäälysteet ja sementtistabilointi, käsikirja (käännös Betong på Mark), Rakennusteollisuus r.y. Suomen Betoniteollisuuden keskusjärjestö SBK r.y. 1985.

Bitumilla sidottujen liikennealueiden mitoitusohje, Oulun yliopiston tie- ja liikennetekniikan laboratorio, Neste Oy, 1990.

Bitumistabilointi, raportti, koetiet 1985 - 1988, Pank ry stabilointitoimikunta Helsinki 1983.

Bäcklin, R. Maanrakennus ja kuljetus 3/84.

Chamberlain, E., CRREL Monograph 81-2. Frost susceptibility of soil. Review of index tests. Hanover 1981. s. 121.

Colombier et al. Fissuration de retrain des chaussées à assises traitées aux liants hydrauliques. Bull liaison labo. p. et ch., 156 (1988), p. 37 - 66 et 157 (1988), p. 59 - 87.

Corwin, B., Skumasfalt i Norge. Nordiska vägtekniska förbundets XIV kongress 6.6.1984 i Stockholm. Del II, 1984.

Eerola, M. Moreenin jalostaminen maanrakennustarkoituksiin, Insko, 1984 - 87.

Egmond, W.B., Stabilisierte Schichten, Strasse und Verkehr 1976:12.

Friberg, P. & Slunga, E. Maalajien routivuuskriteerien kehittäminen. Teknillinen korkeakoulu, rakennetekniikan laitos, pohjarakenne ja maamekaniikka. Otaniemi 1989.

Geomekaniikka I, luku 1. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto, 1985.

Geomekaniikka II, luku 17.5 (K. Kujala). Maapohjan vahvistaminen lisäaineilla. RIL. Helsinki 1990.

Hartikainen, O-P., Maarakennustekniikka 435, Otakustantamo, 1981 s. 1-87.

Heikkilä, J., Moreenin jalostus. Teknillinen korkeakoulu, Rakennusinsinööriosasto, Tietekniikka. Espoo 1986. 94 s.

Helenelund, K.V., Moreenimaalajien kantavuusominaisuuksista. VTT, Tiedotussarja III-Rakennus-79. Helsinki 1964. 113 s.

Henk, B., Planung und Ausführung von Bodenverfestigungen mit Zement, Strassenbau-Technik 1972:18.

Hyypä, J., Rakennekerrosten stabilointi, luentomoniste, Helsingin teknillinen korkeakoulu.

Höbeda, P., Stabilisering och modifiering av svaga vägöverbyggnader med bindemedel - val av bindemedel, En litteraturstudie, VTI meddelande 553, Statens väg- och trafikinstitutet, Linköping 1988.

Jacobson, T., Förstärkning av lågtrafikerade vägar genom inblandning av bituminösa bindemedel, Provvägar och laboratorieprovning, Huvudrapport, VTI meddelande 666. Statens väg- och trafikinstitutet, Linköping 1991.

Jämsä, H. Pohjamaan kantavuus tierakenteen alla, tiedote 526, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 1985.

Kankainen, J., Maarakennustyöt, Maa- ja kalliorakenne, RIL 98, Helsinki 1976.

Kauranne, L.K., Gardemeister, R., Korpela, K., Mälkki, E. Rakennusgeologia II, 304. Teknillisen korkeakoulun ylioppilaskunta. Otaniemi 1972.

Kezdi, A., Stabilisierte Erdstrassen, Budapest 1973, Verlag für Bauwesen Berlin.

Koski, H. Sitomattoman moreenimurskeen käyttö tien päällysrakenteessa. Tampereen teknillisen korkeakoulun diplomityö. Tampere, 1986.

Laadunvalvontaohjeet. TVH 2.816 1971.

Lee, D.Y., Treating marginal aggregates and soils with foamed asphalt. Asphalt paving technology, Vol. 50, 1981.

Lehtipuu, E., Asfalttipäällysteet, Rakentajain Kustannus Oy, Helsinki, 1983.

Leinonen, M. Kokemuksia bitumistabiloinnista. Nesteeltä lähetetty aineisto.

Lindgren, P., Tierakenteiden stabilointi sementillä. HTKK Tietekniikka. Otaniemi 1980, 87 s.

Maabetonitöiden työselitys 1984. Tie- ja vesirakennushallitus, tienrakennustoimisto. TVH 731464.

Maarakennusalan tutkimus- ja suunnitteluohjeita, Osa II, Helsinki 1973, TVH 2.660.

Markkanen, P., Maabetoni, sementillä ja kalkilla lujittaminen, Helsinki 1970, Sementtiyhdistys.

Markkanen, P., Sementti ja kalkki savoratiedien tehostetussa kunnossapidossa ja perusparantamisessa, Sementtiyhdistyksen tiedotuksia 1969:2.



Markkanen, P., Sementtistabilointiurakointia Suomessa, Sementtiyhdistyksen tiedotuksia 1973:3.

Meriläinen, J., Sementin ja masuunikuonan käyttö moreenin stabiloinnissa. Helsingin teknillisen korkeakoulun diplomityö. Otaniemi 1986. 76 s.

Mobil Oil Corporation. Kuulutusjulkaisu 57807. 19.1.1971.

Moreenimurskeen stabilointikoe. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tie- ja liikennelaboratorio. Tutkimusselostus 405, Espoo 1983.

Nevala, E., Tien rakenteen mitoittamisesta sekä maabetonista tien rakenne- materiaalina, Sementti- ja kalkkistabilointikurssi 30 - 31.10.1975, Sementtiyhdistys.

Niemelä, J & Palmu, J-P., Moreeni. Maansiirto 8/1991.

Niskanen, M. Moreenimurskauksista ja moreenimurskeen käytöstä TIEL:n Kainuun piirissä. Menetelmien vaihtopäivät Rovaniemellä 8. - 9.12.1981.

Nousiainen, J. Sementillä stabiloitu moreenimurske tien päällysrakenteessa. Tutkimusraportti maabetonitöistä, Tampereen teknillinen korkeakoulu, rakennusgeologian laitos. Tie- ja vesirakennuslaitos, Hämeen piiri. 1989.

Näpänkangas, P., Moreenin käytöstä sementtistabiloituna tierakenteessa. Oulun yliopiston rakentamistekniikan osasto. Diplomityö. Oulu 1973. 116 s.

Patentti- ja rekisterihallitus, Kuulutusjulkaisu 61226, 26.02.82.

Paulman, G., Erläuterungen zur Anwendung der "Technischen Vorschriften und Richtlinien für die Ausführung von Bodenverfestigungen und Bodenbesserungen im Strassenbau, Strasse und Autobahn 1975:10.

Pohjarakennus RIL 95, Geotekninen maaluokitus. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto. Helsinki 1974. s. 10 - 27.

Pojjärvi, H., Kiviaineksen hienojakoisimman osan vaikutuksista betonin ominaisuuksiin, VTT julkaisu 110, Helsinki 1966.

Pospisil, F., Kritische Belagsdicke auf zementverfestigten Tragschichten, Strassen und Tiefbau 1973:6.

Pulkki, R., Aitolahti, M., Liikkuva moreenimurskain metsätien rakentamisessa.

Pylkkänen, K., Masuunikuona maarakentamisessa. Yhteenveto projektin puitteissa tehdyistä tutkimuksista. Tampereen teknillinen korkeakoulu, rakennusgeologian laitos. Tampere 1993.

Rakennuskoneet. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto r.y., Helsinki, 1972.

Rakentajain kalenteri 1989. Osa 1, Rakentajain Kustannus Oy, Helsinki 1989.

Ravaska, O. Hepokönkään tekoallas-suunnitelma. Oulun yliopiston rakentamistekniikan osasto. Diplomityö. Oulu 1970.

Rieke, R., Vinson, T., Mageau, D., The Role of Specific Surface Area and Related Index Properties in the Frost Heave Susceptibility of Soils. 4<sup>th</sup> Int. Conf. of PF. 1983. s. 1066 - 1071

RILEM. Reflective Cracking in Pavements. State of the Art and Design Recommendations. Proceedings of the Second International RILEM Conference. University Press, Cambridge, Great Britain 1993.

Saarela, A. Soratien kulutuskerrostutkimus II, työtutkimustiedote 20a, tie- ja vesirakennushallitus, rakentamistalouden toimisto, TVH 732742, 1978.

Sementtistabilointi, Tielaitos, Kehittämiskeskus, Työselitykset ja laatuvaatimukset, TIEL 2211464-93, Helsinki 1993.

Sementtistabilointiohje, Tielaitos, Tiehallitus, Valvonta ja laadunvalvonta, TIEL 2222614, Helsinki 1992.

Sloth, S., Förberedda diskussioninlägg rörand stabiliseringsteknik, Använding av cement och kalk i vägbyggnad, III Nordisk Konferenssen 1970, Sementtiyhdistys.

Sommer, H., Ausschreibung, Überwachung und Abnahme von Bodenstabilisierungen mit Zement, Strassen- und Tiefbau 1969:9.

Sommer, H., Bodenstabilisierung mit Zement und Magerbeton in europäische Strassenbau, Paris 1970, Beton-Verlag GmbH Düsseldorf.

Soveri, J., Varjo, M. Roudan muodostumisesta ja esiintymisestä Suomessa vuosina 1955 - 1975. Vesitutkimuslaitoksen julkaisuja 20. Helsinki, 1977. 66 s.

Stabilointiohjeet, kalkki- ja sementtistabilointi, Helsinki 1973, TVH 2.614.

Susimaa, J., Moreenimaapatojen routaantuminen ja routiminen. Vesihallituksen monistesarja 94. Helsinki 1981. s. 1 - 9, 37 - 39.

Taivainen, O. A. Tutkimuksia moreenin käyttökelpoisuudesta tien kantavassa kerroksessa. Maansiirto 1973:4.

Talonrakennuksen routasuojausohjeet, VTT Geotekniikan laboratorio. Rakentajain Kustannus Oy. Helsinki, 1987.

Teiden suunnittelu. TIEL:n ohjeet, kansio B. Tie- ja vesirakennushallitus, 1985.

Tophinke, G., Verfahren zur Bestimmung des Zementgehaltes bei der Bodenverfestigung mit Zement, Strassenbau-Technik 1972:11.

Valkonen, A., Nopeasti vedellä jäähdytettyjen kuonatuotteiden käyttö yhdessä bitumiemulsion kanssa tien rakennusmateriaalina. Tampereen teknillinen korkeakoulu, rakennusgeologian laitos. Tampere 1993. (julkaisematon tutkimusraportti).

Vägverket, BDa 7, Johansson, C., Framställning av överbyggnadsmaterial ur morän. BDa-rapport 87703-11, 7.5.1987.

Vägverket, BD 2, Ramberg, A., Framställning av överbyggnadsmaterial ur morän. Delrapport, BD-rapport 91211-11, 10.6.1990.

Weckström, L., Maabetoni asfalttipäällysteen alustana, Asfaltti 1974:16.

Wills, B. A. Mineral Processing Technology Third Edition, Pergamon Press. Oxford et.al, 1985.

Ylinampa, K. & Vesa, H. Bitumistabilointi, käytännön ohjeita, mitoitus, Tielaitos Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö, Tielaitoksen selvityksiä 4/1990, Oulu 1990.

Äijö, J., Vaahtobitumiasfaltin käyttö kantavuuden parantamiseen, Helsingin teknillinen korkeakoulu, diplomityö, 1985.

Örbom, B., Svenska erfarenheter av olika metoder att begränsa prick- bindningen vid cementstabilisering, Cement i veg, IV Nordisk Konferensen, Nordisk Vejteknisk Forbund.



## TIEHALLITUKSEN SISÄISIÄ JULKAISUJA

- 5/1991 Massanvaihdon korvaaminen moreenitukiseinällä. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 6/1991 Havupuuhaake pengertäytteenä. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 13/1991 Tieverkkojen asentaminen, käytännön ohjeita. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 16/1991 Asfalttimassan suhteitus Marshal-menetelmän mukaan. Geopalvelukeskus
- 17/1991 Murskeen muodonmuutosominaisuudet tien rakennekerroksissa. Geopalvelukeskus
- 23/1991 Betonipäällysten seuranta; Raportti suunnittelusta ja rakentamisesta. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 32/1991 Moreenin käyttö tierakenteissa. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 39/1991 Koerakenteita turve- ja selttipehmeikölle. Geokeskus, Oulun kehitysyksikkö
- 20/1992 Vanhojen tienrakennekerrosten uudelleen käyttö. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 26/1992 Kalliomurskeiden käyttö sitomattomissa rekennekerroksissa, esiselvitys. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 42/1992 Pehmeikölle perustettavan tiepenkereen geotekniset laskelmat. Geopalvelukeskus
- 43/1992 Pehmeikölle rakennettavien tieleikkausten geotekniset laskelmat. Geopalvelukeskus
- 44/1992 Saven varaan perustetut alikulkukäytävät. Geopalvelukeskus

## TIELAITOKSEN SISÄISIÄ JULKAISUJA

- 32/1993 V-poikkileikkaus ja teräsverkot tierakenteissa; Tulokset V-poikkileikkauksen ja teräsverkkojen käyttökokeista tien pituussuuntaisten halkeamien ehkäisyssä. TIEL 4000043
- 48/1993 Geopalveluiden maksu- ja mittausperusteet; Geopalveluyksiköiden tuloslaskelmat. TIEL 4000049

## TIELAITOKSEN TUTKIMUKSIA

- 4/1992 Tiepenkereen holvautuminen, loppuraportti. TIEL 3100005

## TIELAITOKSEN SELVITYKSIÄ

- 1/1992 Pystyjanauhojen laatuvaatimukset; laadunvalvonta ja testausmenetelmät. TIEL 3200057
- 31/1992 Pohjaveden maatiivistesuojan tiivistäminen. TIEL 3200086
- 46/1992 Syvästabiloinnin laadunvalvontaohje. TIEL 3200099
- 62/1992 Hienoaineksen vaikutus stabiloidun moreenimurskeen pakkaskestävyyteen. TIEL 3200112
- 68/1992 Tien pohja- ja päällysrakenteet -tutkimusohjelma (TPPT), perussuunnitelma. TIEL 3200118
- 69/1992 Rakennettujen ja perusparannettujen teiden tasaisuus. TIEL 3200119
- 78/1992 PTM-auton tuottamien tunnuslukujen käyttökelpoisuus ja vertailtavuus sekä niiden yhteys Laser-mittauksiin (IRI, IRI4, PI/Laser). TIEL 3200134

## TIELAITOKSEN SELVITYKSIÄ

- 1/1993      Arktinen tienrakentaminen. TIEL 3200121
- 8/1993      Sitomattoman kantavan kerroksen rakentaminen. TIEL 3200135
- 15/1993      Masuunikuonan käyttö sitomattomissa päällysrakennekerroksissa. TIEL 3200142
- 16/1993      Betonipäällysteen seuranta; Vt 4 Kempele-Kiviniemi, seurantaraportti nro 1. TIEL 3200144
- 19/1993      Teiden kuntoa ja palvelutasoa koskeva seurantatutkimus. TIEL 3200145
- 20/1993      Moreeni ja sen käyttö. TIEL 3200146
- 26/1993      Bentoniittimattojen ja muovikavojen kelpoisuus pohjaveden suojaukseen, tutkimuksia ja suosituksia. TIEL 3200152
- 34/1993      Kalliomurskeiden tiivistyminen ja hienoneminen, esitutkimus. TIEL 3200159
- 36/1993      Palaturpeen käyttö lämmöneristeenä, raportti koerakenteiden rakentamisesta. TIEL 3200161
- 38/1993      Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet; Kirjallisuusselvitys. TIEL 3200163
- 39/1993      Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet; Esiselvitysvaiheen kuormituskokeet. TIEL 3200164
- 40/1993      Teiden tasaisuusmittareiden vertailu; PTM:n, Roadmanin ja Dipstickin laitevertailu sekä epätasaisuuksien vaikutus tierasitukseen. TIEL 3200165
- 41/1993      Stabiloidun materiaalin maksimiraekoon sekä koekappaleen koon ja muodon vaikutus puristuslujuuteen. TIEL 3200166
- 47/1993      Väsymissuorat tierakenteen mitoitusta varten. TIEL 3200172
- 59/1993      Valtatien 3 routamitoitus routanousun mukaan välillä Riihimäki P - Virala. TIEL 3200184
- 60/1993      Jännitys- ja muodonmuutosmittaukset tierakenteessa 1991-1992; Pohjaveden pinnan vaikutus, tienpinnan taipumamittaus eri lämpötiloissa, vertailu standardi paripyörä - Neste Oy:n kantavuusradan pyörä. TIEL 3200185
- 68/1993      Kuitukankaat tienrakennuksessa; Uudistetun VTT-GEO luokituksen mukaiset laatuvaatimukset. TIEL 3200193
- 71/1993      Nonwoven Geotextiles in Road Constructions. TIEL 3200193E
- 76/1993      Rakennettujen ja perusparannettujen teiden tasaisuus 1992-1993. TIEL 3200200

### *Geotekniikan informaatiojulkaisuja:*

- 2/1993      Massanvaihto. TIEL 3200127
- 21/1993      Pengerpaalutus. TIEL 3200147
- 23/1993      Pohjanvahvistusmenetelmän valinta. TIEL 3200149
- 24/1993      Tiegeotekniikan yleiset mitoitusperusteet. TIEL 3200150

ISSN 0788-3722  
ISBN 951-47-8136-8  
TIEL 3200201